

Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

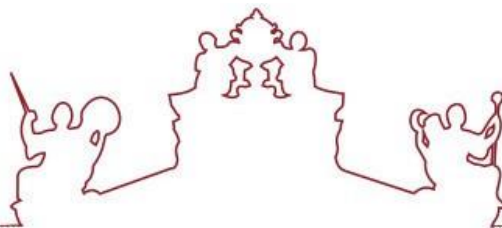
**Monitorização de uma rede de painéis fotovoltaicos usando
um sistema embarcado de baixo custo**

Roberto Brandão Schmalb

Orientador(es) | Mouhaydine Tlemçani

Évora 2021





Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

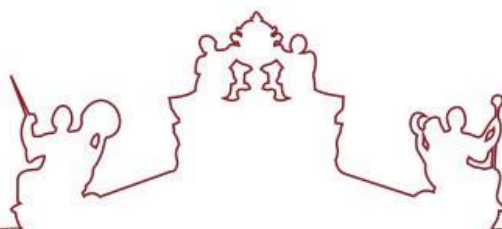
**Monitorização de uma rede de painéis fotovoltaicos usando
um sistema embarcado de baixo custo**

Roberto Brandão Schmalb

Orientador(es) | Mouhaydine Tlemçani

Évora 2021





A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente		Paulo Canhoto (Universidade de Évora)
Vogais		Fernando Manuel Janeiro (Universidade de Évora) (Arguente) Mouhaydine Tlemçani (Universidade de Évora) (Orientador)

Dedicatória

Dedico este trabalho a **Maria Lúcia e Marcelo**, pois sem eles
jamais teria decidido a vir estudar em Évora, Portugal.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é o resultado do desejo permanente pela busca de conhecimento, que sempre foi encorajado pela minha mãe, D. Altair (in memoriam).

Primeiro, agradeço ao meu orientador, professor Mouhaydine Tlemçani, por ter acolhido o meu projeto, e de me orientar neste trabalho, apesar de não ser um dos professores do meu curso, tivesse aceitado me orientar.

Agradeço também aos meus dedicados professores da Universidade de Évora, que foram pacientes com todas as minhas dificuldades, e que, para ultrapassar as dificuldades impostas pelo isolamento social, não fizeram qualquer esforço para procurar alternativas para continuar os seus ensinamentos através de videoconferências, aulas virtuais, apresentação de trabalhos e avaliações remotas, permitindo a conclusão do mestrado em Engenharia de Energia Solar.

Gostaria também de agradecer a todos os meus colegas do mestrado, em especial a Alberto Paolillo, cujo apoio e amizade estiveram sempre presentes.

Agradeço também aos meus colegas de laboratório, em especial Leonardo Andrade e Oumaima Mesbahi, que me ajudaram na minha pesquisa e trabalho.

Finalmente, agradeço à minha família, amigos e vizinhos pelo apoio incondicional e encorajamento para alcançar os meus objetivos, mesmo à distância, pelas palavras de motivação e incentivo a fazer o mestrado.

E para concluir, uso as palavras de Roosevelt, que sempre foram referência e orientação em tudo o que faço:

"É muito melhor arriscar grandes coisas, alcançar o triunfo e a glória, mesmo que expostos à derrota, do que alinhar-se com os pobres em espírito, que não gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa escuridão cinzenta, que não conhece nem a vitória nem a derrota."

Theodore Roosevelt (1858 - 1919)

RESUMO

Pequenos sistemas de geração de energia fotovoltaica podem ser usados para reduzir as tarifas comerciais de energia para residências. Se o sistema estiver bem dimensionado, os custos da energia comercial podem atingir os valores mínimos. Nesta situação, a compra de energia comercial passa a ser basicamente uma situação de backup, sendo usada apenas nos dias chuvosos ou mesmo nos dias com baixa irradiação, quando a produção não atinge os valores necessários ao consumo. O objetivo deste estudo é apresentar um projeto de sistema fotovoltaico e desenvolver um programa para um microcontrolador, que permita obter algumas informações relevantes ao sistema, como temperatura, corrente, tensão, potência de cada um dos painéis, e enviar por uma rede sem fios à internet, permitindo a monitorização à distância do sistema, identificando quaisquer alterações, possibilitando uma gestão mais eficaz e a rápida manutenção e correção, mantendo assim a máxima eficiência do sistema conforme projetado. Todo o processo será controlado por um microcontrolador Arduino, com uma interface que permita a interconexão com a rede Internet, utilizando o protocolo TCP IP. Dessa forma, com acesso à Internet, o utilizador poderá ter acesso a todas as informações no sistema instalado.

Palavras-chave: Arduino, Energia Elétrica, Sistema Fotovoltaico, Microcontrolador, Telefone Celular.

MONITORING A FOTOVOLTAIC NETWORK USING A LOW COST EMBEDED SYSTEM

ABSTRACT

Small photovoltaic power generation systems can be used to reduce commercial energy tariffs for homes. If the system is well sized, the costs of commercial energy can reach the minimum values. In this situation, the purchase of commercial energy becomes basically a backup situation, being used only on rainy days or even on days with low irradiation, when production does not reach the values necessary for consumption. The aim of this study is to present a photovoltaic system design and develop a program for a microcontroller, which allows to obtain some relevant information to the system, such as temperature, current, voltage, power of each of the panels, and send by wireless network to the internet, allowing remote monitoring of the system, identifying any changes, enabling more effective management and a quick maintenance and correction, thus maintaining maximum system efficiency as designed. The entire process will be controlled by an Arduíno microcontroller, with an interface that allows interconnection with the Internet network, using the TCP IP protocol. In this way, with internet access, the user can have access to all the information on the installed system.

Keywords: Arduíno, Electrical Energy, Photovoltaic System, Microcontroller, Cell Phone.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
LISTA DE ABREVIATURAS	VIII
1. INTRODUÇÃO	9
1.1 ENQUADRAMENTO	10
1.2 MOTIVAÇÃO	11
1.3 OBJETIVOS	11
1.4 ESTRUTURA	12
2. ESTADO DA ARTE	14
2.1 RADIAÇÃO SOLAR	16
2.2 RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL, EM SERGIPE E EM ARACAJU	21
2.3 EFEITO FOTOVOLTAICO	22
2.4 PAINEL FOTOVOLTAICO	24
2.5 MODELO EQUIVALENTE	26
3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	32
3.1 AUDITORIA ENERGÉTICA	33
3.2 PROJETO DO SISTEMA	35
3.3 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO CIRCUITO	38
3.3.1 O ARDUÍNO	38
3.3.2 ESP8266-01	40
3.4 METODOLOGIA	41
3.4.1 MEDIDA DA TENSÃO	41
3.4.2 MEDIDA DA CORRENTE	43
3.4.3 MEDIDA DA POTÊNCIA	44
3.4.4 MEDIDA DA TEMPERATURA	45
3.4.5 ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO	45
3.5 PROGRAMA PARA O ARDUÍNO E ESP8266-01	46
4 RESULTADOS	49

5 CONCLUSÕES	57
PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	58
REFERÊNCIAS.....	60
ANEXO I – PROGRAMA DO ARDUÍNO	63
ANEXO II – PROGRAMA DO ESP8266-01	66
ANEXO III –PÁGINA HTML.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Posição da terra em relação ao sol.....	16
Figura 2-2 - Níveis de irradiação no topo da atmosfera em função dos dias do ano.....	17
Figura 2-3 - Nível de radiação em função do comprimento de onda.....	18
Figura 2-4 - Movimento relativo do sol, considerando a terra fixa	19
Figura 2-5 - Definição de <i>air mass</i> (AM).....	19
Figura 2-6 - Componentes da irradiação solar	20
Figura 2-7 - Espectro eletromagnético e espectro solar	21
Figura 2-8 - Insolação diária média anual, em horas – Carta 314.....	21
Figura 2-9 – Diagrama esquemático de uma célula fotovoltaica	26
Figura 2-10 - Curvas características I x V de uma célula no escuro e iluminada	27
Figura 2-11 - Relação entre os diversos parâmetros de uma célula fotovoltaica	29
Figura 2-12 - Modelo com um diodo e cinco parâmetros	30
Figura 2-13 - Curvas Corrente e Tensão.....	31
Figura 3-1 - Consumo médio mensal	34
Figura 3-2 - Índice de radiação mensal	34
Figura 3-3 - Protótipo utilizado do controlador e periféricos.	37
Figura 3-4 - Diagrama em blocos do circuito.....	38
Figura 3-5 - Blocos do Arduino Uno	39
Figura 3-6 - Módulo Wireless ESP8266-01	40
Figura 3-7- Divisor de tensão	41
Figura 3-8 - Amplificador operacional básico	43
Figura 3-9 - Fonte DC-DC	45
Figura 3-10 – Fluxograma programa do Arduino	47
Figura 3-11 - Fluxograma do programa do ESP8266-01	47
Figura 3-12 - Fluxograma da página HTML.....	48
Figura 4-1- Circuito do simulador	50
Figura 4-2 - Gráfico Tensão x Corrente.....	51
Figura 4-3 - Circuito Eletrônico.....	51
Figura 4-4 - Gráfico Tensão X Corrente no Circuito Real.....	52
Figura 4-5 – Gráficos superpostos: Simulador e Circuito Real.....	53
Figura 4-6– Linearidade do sensor de Tensão.....	54
Figura 4-7 - Linearidade do Sensor de Corrente	55
Figura 4-8 - Página HTML	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Ângulo de declinação solar	18
Tabela 2.2 - Dados climatológicos de Aracaju – 1981 a 2010	22
Tabela 3.1 - Dados Elétricos do Painei (STC).....	33
Tabela 4.1 - Valores de tensão e corrente do simulador.....	50
Tabela 4.2 - Valores de tensão e corrente circuito real.....	52
Tabela 4.3 - Valores de tensão medidos	53
Tabela 4.4 - Valores de corrente	54
Tabela 4.5 - Preços médio dos Dispositivos eletrônicos	55

LISTA DE ABREVIATURAS

AM	<i>Air Mass</i> – Massa de ar
AVR	Arquitetura de um microcontrolador <u>A</u> lf – <u>V</u> egard – <u>R</u> ISC.
Bit	<i>Binary digit</i> - Dígito binário, menor unidade digital (0 ou 1)
C/C++	Linguagem de programação orientada a objeto
COM	Porta de comunicação Serial
EEPROM	<i>Electric Erasable and Programmable Read Only Memory</i> – Memória Programável e Apagável Eletricamente, de Somente Leitura.
I/O	<i>Input / Output</i> – Entrada / Saída
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> – Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IP	<i>Internet Protocol</i> – Protocolo Internet
LED	Light Emission Diode – Diodo Emissor de Luz
LCD	<i>Liquid Cristal Display</i> - Mostrador de Cristal Líquido
MQTT	<i>MQ Telemetry Transport</i> – Protocolo de comunicação entre máquinas
PC	<i>Personal Computer</i> – Computador Pessoal
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i> – Sistema de Informações Geográficas Fotovoltaicas
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – Modulação por Largura de Pulsos
SCL	<i>Serial Clock</i> – Linha de Sincronismo
STC	<i>Standard Test Conditions</i> – Condição Padrão de Testes
SDA	<i>Serial Data</i> – Linha de Dados
SRA	<i>Static Random Access Memory</i> – Memória Estática de Acesso Aleatório
TCP	<i>Transmition Control Protocol</i> – Protocolo de controle transmissão
WRC	<i>Word Radiation Center</i> – Centro de Radiação Mundial

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se conceitos, as motivações que levaram à elaboração deste trabalho, o seu enquadramento, os objetivos, a descrição da forma de organização desta dissertação e as notações utilizadas.

1.1 ENQUADRAMENTO

Este trabalho se insere no âmbito da obtenção de grau de Mestre em Engenharia da Energia Solar, na Escola de Ciências e Tecnologia – Departamento de Física da Universidade de Évora.

No contexto atual, de grande demanda das energias renováveis em todo os países do mundo, considerou-se importante o estudo dos sistemas de transformação da energia solar, tanto para o processo de geração de calor, através de sistemas de conversão de energia solar em energia térmica, quanto a de geração de energia elétrica através dos painéis fotovoltaicos.

Assim este trabalho irá abordar o tema do gerenciamento da energia fotovoltaica aplicada a um caso prático, na cidade de Aracaju, no nordeste do Brasil com o uso de um microcontrolador para fazer o gerenciamento remoto deste sistema.

Trata-se de uma região com um dos maiores índices de radiação solar no Brasil, com muitos poucos dias nublados ou com chuvas, portanto um local ideal para a utilização da energia solar para a geração de eletricidade.

O objetivo deste trabalho é fazer o gerenciamento de painéis solares, através da medição de alguns parâmetros vitais para o seu bom funcionamento: tensão, corrente, potência e a temperatura, utilizando-se para isto eletrônica embarcada, através de um microcontrolador Arduino e algumas interfaces periféricas.

O microcontrolador e os seus periféricos são equipamentos pré-montados, que permitem realizar tarefas complexas a um custo muito baixo.

Temos valores padronizados, definidos no projeto do sistema, e se faz necessário então comparar estes valores com os valores obtidos na medição, feita a cada 20 segundos.

Por comparação, poderemos observar o comportamento elétrico dos painéis fotovoltaicos, e caso detectar-se alguma variação discrepante, tomar as devidas providências.

Precisa-se ter noção do funcionamento do processo da geração fotovoltaica instalada, pois em dias de baixa luminosidade, teremos uma redução nos indicadores, o que deve normalizar quando o sol voltar a iluminar suficientemente os painéis. O que deve ser observado é que em situações normais de luminosidade, caso surjam variações significativas nas medidas, indicando assim uma falha.

O conjunto formado com o Arduíno e o ESP8266-01, que fazem estes equipamentos de monitoração podem ser instalados logo atrás do painel, usando a alimentação gerada pelo próprio sistema. Como o consumo do conjunto Arduíno + ESP8266-01 é muito baixo, não irá impactar no processo de geração de energia fotovoltaica.

1.2 MOTIVAÇÃO

O sol é a maior fonte de energia até agora conhecida e a mais democrática: atende a todos sem distinção. Uma das formas do seu aproveitamento é a geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos.

A energia solar tem sido tópico de inúmeros trabalhos nas últimas décadas com o intuito de promover um desenvolvimento sustentável.

A utilização de microcontroladores de baixo custo tem de certa maneira facilitado a execução de tarefas complexas que eram relegadas a um segundo plano por exigirem um investimento muito alto nos equipamentos que tinham a capacidade de realizá-las.

Com a instalação deste sistema de monitoração, esta tarefa ficará acessível, visto que a visualização dos resultados das medidas poderá ser realizada localmente, ou pelo telefone celular, por um computador pessoal ou tablet que tenham acesso à Internet.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é propor o projeto de um sistema fotovoltaico com gerenciamento, através de um microcontrolador Arduíno, da tensão, corrente, temperatura e potência gerada por cada um dos painéis que compõem o sistema, ou do conjunto como um todo.

Todas estas informações poderão ser visualizadas através do telefone celular, ou por qualquer sistema que utilize um navegador Internet através da rede TCP-IP.

Com base nestas informações, poderá ser analisada a performance dos painéis solares, e a depender do tipo de problema visualizado, fazer a devida correção no menor prazo possível, evitando assim a degradação do sistema inicialmente projetado, através da manutenção das suas características elétricas.

Ao verificar a redução da potência gerada, em condições normais de insolação, pode-se verificar em que condições se encontra um determinado painel, se existe alguma sujidade que está afetando o seu rendimento, ou algum tipo de sombreamento parcial que esteja reduzindo a produção de energia, por exemplo.

A existência de danos físicos no painel também pode ser identificada através da variação nos níveis de energia pré-definidos em projeto. A quebra ou queima de uma célula vai reduzir a tensão, corrente e por consequência, a potência gerada. A elevação de temperatura isolada em um único painel dentre todos também indica algum tipo de falha.

Os objetivos do trabalho são:

1. Estudar o recurso solar e as condições ambientais para Aracaju, Brasil.
2. Fazer o projeto do sistema fotovoltaico mais indicado para o local.
3. Desenvolver um programa de gerenciamento do sistema.
4. Fazer com que o sistema de monitoração tenha o menor custo possível
5. Desenvolver um sistema de visualização das medidas de maneira local e remota.

1.4 ESTRUTURA

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos. O presente capítulo aborda a motivação, o enquadramento e os objetivos da dissertação.

No segundo capítulo é descrito o estado da arte, onde será abordada parte da história das tecnologias fotovoltaicas.

No terceiro capítulo é apresentado a análise do consumo e o projeto completo para geração da energia produzida por sistemas de conversão de energia fotovoltaicos, o programa para o Arduino e o ESP8266-01 realizar o monitoramento dos painéis e a interface de usuário pela internet.

No quarto capítulo apresentam-se as análises e os resultados obtidos no projeto.

No quinto e último capítulo apresenta-se as conclusões e sugestões / propostas de trabalhos futuros.

Nos anexos, os programas para o Arduino, o ESP8266-01 e a página HTML.

1.5 NOTAÇÃO

Este trabalho foi escrito baseado no novo acordo ortográfico. As fontes e citações são no estilo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). As figuras, tabelas e equações matemáticas são referenciadas usando-se o número sequencial e o capítulo no qual estão localizadas.

2

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é descrito o estado da arte, onde será abordada parte da história das tecnologias fotovoltaicas.

O aumento na demanda por energias alternativas em substituição aos sistemas tradicionais, de usinas movidas a carvão, gás e petróleo tem sido uma constante no mundo atual. O vento e o sol têm sido duas grandes opções como matéria prima, consideradas limpas e renováveis, que além do custo zero para sua utilização, não gera poluição tampouco resíduos.

Este trabalho objetiva tratar os sistemas de geração fotovoltaica, que é basicamente a utilização da energia advinda do sol, e transformada em energia elétrica através de painéis fotovoltaicos e equipamentos periféricos.

De acordo com Kalogirou [1], “A energia solar é a fonte de energia mais antiga já usada. O sol foi adorado por muitas civilizações antigas como um Deus poderoso. A primeira aplicação prática conhecida foi na secagem para conservar alimentos.”

Segundo Duffie e Beckham [2], “o sol é uma esfera de matéria gasosa, intensamente quente, com um diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m e está, em média, a $1,5 \times 10^9$ m da Terra. Visto da Terra, o sol gira em seu eixo uma vez a cada 4 semanas. Entretanto, não gira como um corpo sólido, seu equador leva 27 dias e as regiões polares demoram cerca de 30 dias para cada rotação.”

“O Sol é composto primariamente de hidrogênio (74% de sua massa, ou 92% de seu volume) e hélio (24% da massa solar, 7% do volume solar), com traços de outros elementos, incluindo ferro, níquel, oxigênio, silício, enxofre, magnésio, néon, cálcio e cromo.” [3]

Conforme Saraiva & Oliveira Filho [4], o Sol possui a classe espectral G2V: G2 indica que a estrela possui uma temperatura de superfície de aproximadamente 6000K, o que lhe confere uma cor branca (apesar de ser visto como amarelo, alaranjado ou avermelhado no céu terrestre quando está próximo ao horizonte, o que se deve à dispersão dos raios na atmosfera) e o V quer definir a classe de luminosidade, que vai de 0 (zero) a VII (sete, em algarismos romanos), em dez níveis, sendo que o nível I tem três subníveis.

“A duração do dia e a quantidade de energia solar incidente em um ponto qualquer da superfície terrestre apresenta variabilidade temporal característica de dois ciclos: o ciclo anual e o ciclo diário. O ciclo anual ocorre como consequência da inclinação em 23,45 graus do eixo axial da Terra com relação ao plano orbital do planeta em torno do Sol.” [5]

“A duração do dia está intrinsecamente relacionada com as estações do ano. Por convenção astronômica, as estações são determinadas pelos solstícios - momento em que o sol, durante seu movimento aparente na esfera celeste, atinge a maior declinação em latitude medida a partir do Equador - e os equinócios - instante em que o Sol, em sua órbita aparente, cruza o Equador terrestre.” [5]

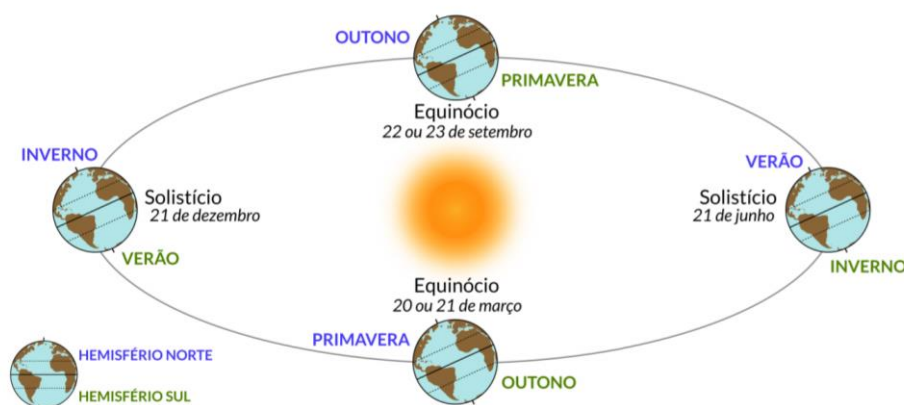


Figura 2-1 - Posição da terra em relação ao sol

Fonte: Pereira et al [5]

“Para a maximização do aproveitamento da energia solar, deve-se ajustar a posição do coletor solar com a latitude local e o período do ano em que a energia é mais requerida.” [6]

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

Segundo Macagnan [7], “A constante solar é a taxa da energia solar total, em todos os comprimentos de onda, fora da atmosfera terrestre, incidente em uma superfície de área unitária em exposição normal aos raios do Sol, a uma distância de 1 UA (distância média Terra-Sol).”

“Sua determinação exata bem como sua distribuição espectral são extremamente importantes não só para aplicações extra-atmosféricas (satélites, naves espaciais etc.), como para aplicações terrestres.” [7]

“A radiação emitida pelo sol e sua relação espacial com a Terra resulta em uma intensidade quase fixa de radiação solar fora da atmosfera terrestre. A constante solar, G_{SC} , é a energia do Sol por unidade de tempo, recebida em uma unidade de área perpendicular à direção de propagação da radiação, em uma distância Terra-Sol média, fora da atmosfera. O valor recomendado pela Organização Meteorológica

Mundial foi obtido do valor médio de oito medidas da constante solar, realizadas entre 1969 e 1980. Este valor é: $G_{SC} = 1367 \text{ Wm}^{-2}$ ou $G_{SC} = 4921 \text{ kJm}^{-2}/\text{h}^{-1}$ com um desvio padrão de $1,7 \text{ Wm}^{-2}$ e um desvio máximo de $\pm 7 \text{ Wm}^{-2}$. [7]

Existe uma variação desta energia solar recebida no topo da atmosfera em função da posição da Terra em relação ao Sol conforme podemos visualizar na figura 2.2, abaixo, válida para o hemisfério norte:

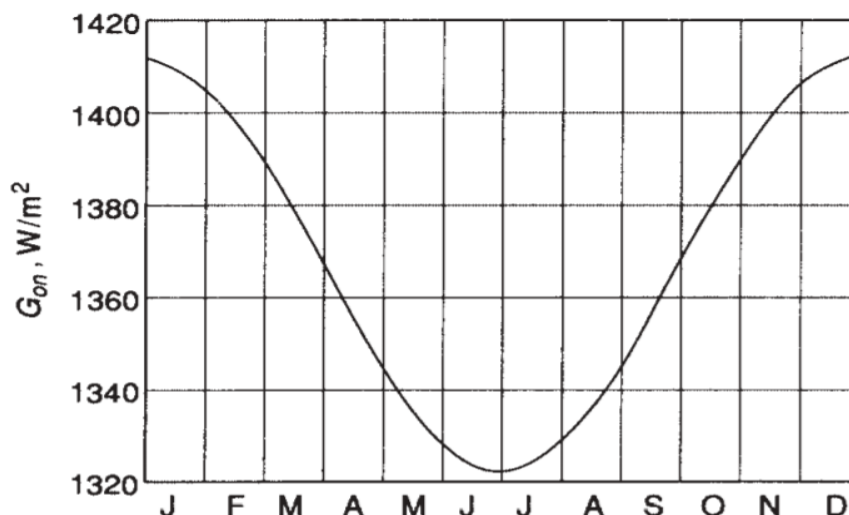


Figura 2-2 - Níveis de irradiação no topo da atmosfera em função dos dias do ano

Fonte: Duffie, Beckman [2]

Podemos calcular esta intensidade de radiação em função do dia do ano pela equação abaixo, onde N corresponde ao dia juliano:

$$G_0(N) = G_{SC} \times \left[1 + 0,034 \times \cos\left(\frac{2\pi \times N}{365}\right) \right] \quad (2.1)$$

Onde: $G_0(N)$ é a radiação incidente no dia "N", N é o dia Juliano (de 1 a 365), G_{SC} é o valor da constante solar (1367 Wm^{-2}) e o cosseno é em radianos.

A declinação solar também é um fator importante para se estimar a radiação incidente. Pode ser calculado pela equação 2.2, abaixo:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \times \frac{284+N}{365}\right) \quad (2.2)$$

Onde N é o dia juliano e neste caso, o seno é calculado em graus.

Utilizando-se os valores médios de cada mês, podemos obter a seguinte tabela:

Tabela 2.1 - Ângulo de declinação solar

Mês	dias no mês	Dia médio Juliano	δ	Mês	dias no mês	Dia médio Juliano	δ
janeiro	31	16	-21,10	julho	31	197	21,35
fevereiro	28	44	-13,95	agosto	31	228	13,45
março	31	75	-2,42	setembro	30	258	2,22
abril	30	105	9,41	outubro	31	289	-9,97
maio	31	136	19,03	novembro	30	319	-19,15
junho	30	166	23,31	dezembro	31	350	-23,37

Como podemos observar, nos meses de junho e dezembro, quando ocorrem os solstícios, a declinação está em torno dos $23,30^\circ$ e durante os equinócios, os ângulos ficam com valores bastante baixos. Isto é o que determina as estações do ano e para se estimar o valor da irradiação em um dia específico do ano.

A irradiância também não é constante, como pode-se verificar abaixo (figura 2.3) onde se apresenta os valores de irradiância em função do comprimento de onda.

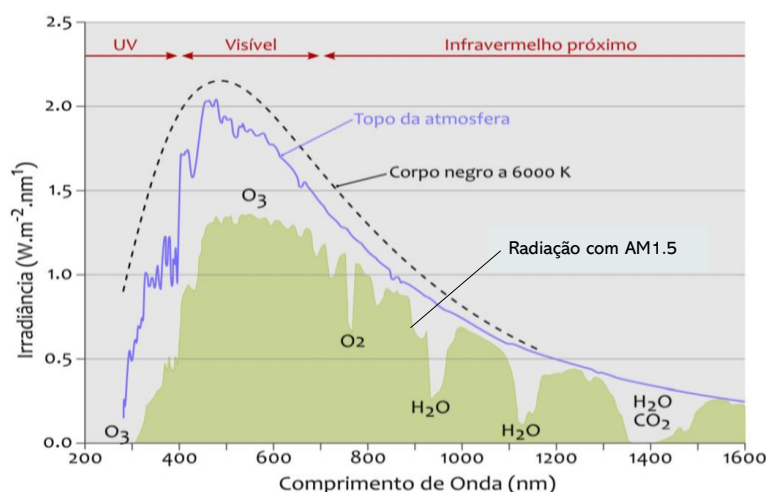


Figura 2-3 - Nível de radiação em função do comprimento de onda

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar [5]

É sabido que a Terra gira em torno do sol, dado este comprovado por Nicolau Copérnico, a 477 anos atrás. Mas, o movimento da Terra ao redor do Sol pode ser descrito como o movimento do Sol ao redor da Terra seguindo o maior círculo, que forma um ângulo de $23,45^\circ$ com o equador celeste (a eclíptica¹).

¹ “Se marcarmos sobre a Esfera Celeste a posição do Sol ao meio-dia durante um ano, ele vai descrever uma circunferência, inclinada $23^\circ 30'$ em relação ao equador da Esfera Celeste. Esta órbita aparente do Sol na Esfera Celeste chama-se eclíptica.” [29]

Segundo Macagnan [7], “...o Sol descreve diariamente e ao redor da Terra, um círculo cujo diâmetro varia dia a dia, sendo máximo nos equinócios e mínimos nos solstícios”, de acordo com a representação da Figura 2.4, abaixo:

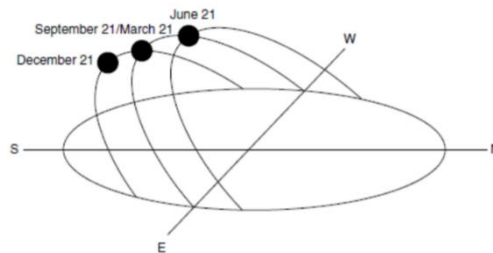


Figura 2-4 - Movimento relativo do sol, considerando a terra fixa

Fonte: Kalogirou [1]

A intensidade da luz solar incidente na Terra depende da latitude, do mês, do dia e do horário, uma vez que a distância na qual a luz do Sol viaja através da atmosfera para a superfície da Terra varia em função desta inclinação.

Conforme Pereira et al [5] “Com o objetivo de permitir a comparação de eficiências de conversão de energia entre diferentes células solares, foi introduzido um espectro padrão conhecido como espectro óptico de massa de ar (AM_x), no qual “x” é definido pela razão entre o comprimento do caminho que a luz viaja do Sol até a posição do observador e o menor caminho possível quando a luz está exatamente no zênite.”

Segundo Yamamoto [8], “... conforme pode ser visto na Figura 2.5, o espectro AM 0 corresponde à radiação fora da atmosfera da Terra e o espectro AM 1 é quando a luz solar atinge a superfície da Terra com incidência direta.”

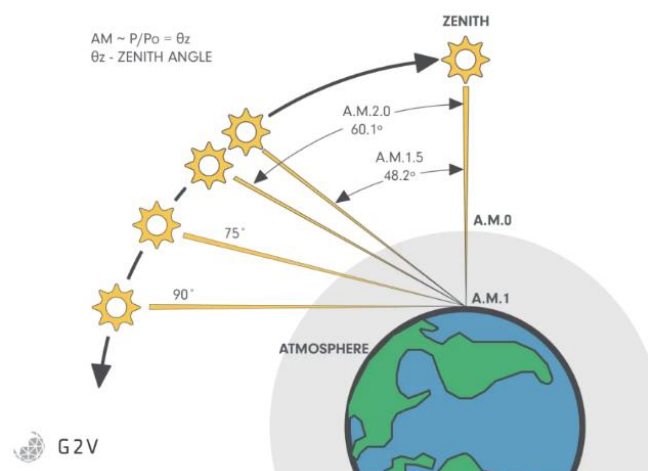


Figura 2-5 - Definição de *air mass* (AM)

Fonte: G2Voptics [9]

“O espectro AM 1.5 ocorre quando a luz solar atinge a superfície com um ângulo de incidência igual a $48,2^\circ$ em relação à incidência direta. Para a caracterização de células solares, o espectro AM 1.5 foi escolhido como espectro padrão e corresponde a uma intensidade média de 100 mW/cm^2 .” [8]

Segundo Pereira et al [5], “a radiação solar incidente, ou irradiância extraterrestre (G_0): é a taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. É também conhecido como irradiância no topo da atmosfera ou G_{TOA} .”

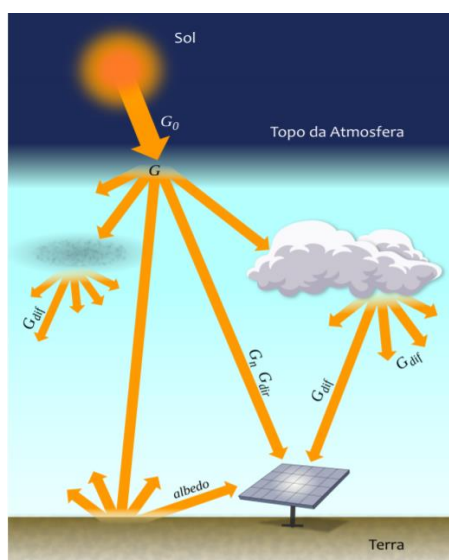


Figura 2-6 - Componentes da irradiação solar

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar [5]

Esta energia, utilizada na conversão fotovoltaica, ao ultrapassar a atmosfera e alcançar a superfície da Terra, divide-se basicamente em direta e difusa.

“A irradiância solar direta apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o Sol e representa a parcela que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera. A componente difusa engloba a radiação proveniente de todas as demais direções que são decorrentes dos processos de espalhamento pelos gases e particulados presentes na atmosfera.” [5]

O espectro de luz solar se estende desde a luz ultravioleta ($0,3 \mu\text{m}$) até o infravermelho próximo, em torno de $3 \mu\text{m}$, sendo que a luz visível compreende o espectro entre $0,38 \mu\text{m}$ (violeta) até $0,78 \mu\text{m}$ (vermelho) como podemos observar na figura 2.7.

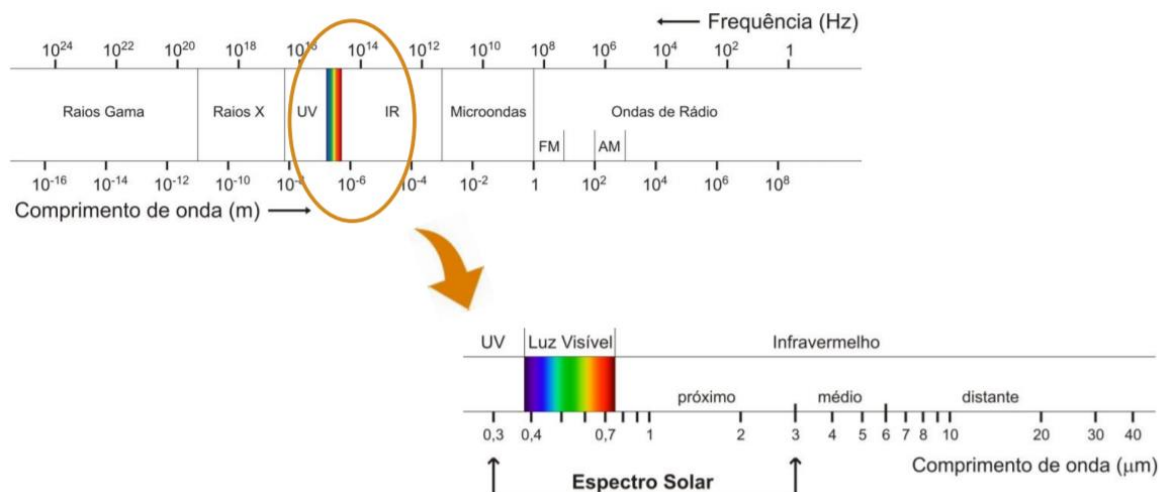


Figura 2-7 - Espectro eletromagnético e espectro solar

Fonte: CB3E – UFSC [10]

2.2 RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL, EM SERGIPE E EM ARACAJU

De acordo com o Atlas Solarimétrico do Brasil 2000 [10], a distribuição de radiação solar se distribui ao longo do território brasileiro de acordo com a figura 2.8. Os valores são de insolação diária, média anual.

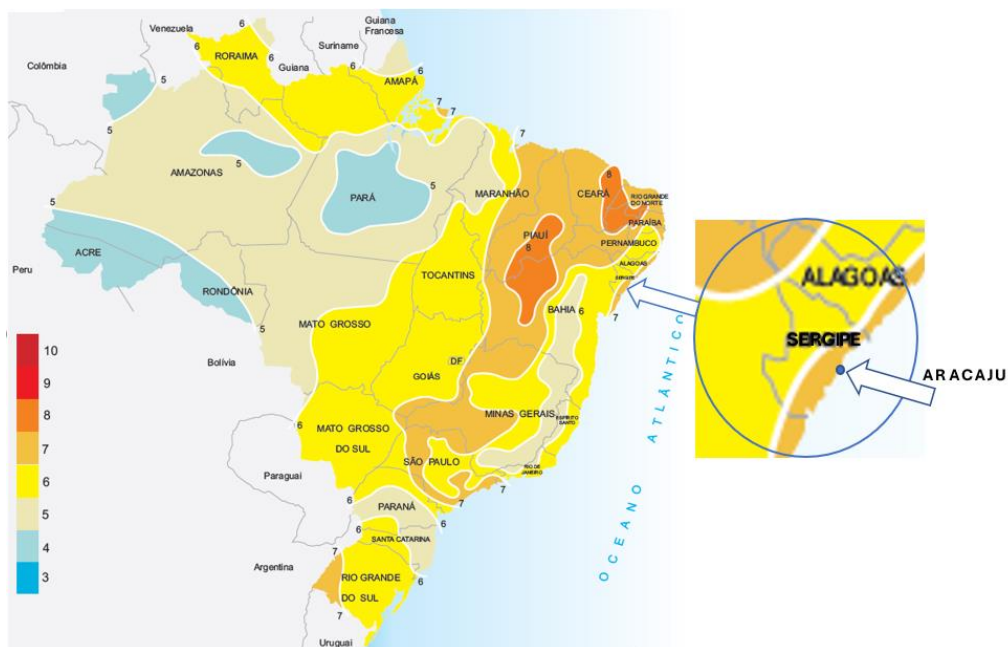


Figura 2-8 - Insolação diária média anual, em horas – Carta 314

Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil [11]

Pode-se observar que o estado de Sergipe se encontra na faixa entre 6 e 7 horas de sol diários, ao longo do ano, o que significa valores médios entre 2.192

e 2.557 horas de sol. A cidade de Aracaju, que fica no litoral tem uma média de 2828,30 horas de sol anuais.

Tabela 2.2 - Dados climatológicos de Aracaju – 1981 a 2010

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Temperatura máxima recorde (°C)	34,20	33,40	34,30	33,70	32,30	31,90	30,10	30,00	30,60	32,50	32,60	33,80	34,30
Temperatura máxima média (°C)	30,30	30,60	30,80	30,30	29,40	28,40	27,70	27,60	28,10	29,00	29,70	30,10	29,30
Temperatura média compensada (°C)	27,20	27,50	27,60	27,20	26,30	25,40	24,70	24,80	25,30	26,10	26,60	27,00	26,30
Temperatura mínima média (°C)	23,70	24,00	23,90	23,60	22,90	22,10	21,70	21,80	22,50	23,00	23,40	23,70	23,00
Temperatura mínima recorde (°C)	18,40	18,80	19,50	18,60	17,80	17,60	17,20	14,60	17,60	17,20	18,00	16,00	14,60
Precipitação média (mm)	51,90	71,70	87,60	174,20	241,80	207,20	157,60	107,50	64,90	60,70	47,10	28,00	1300,20
Dias com precipitação (≥ 1 mm)	6,00	7,00	10,00	14,00	17,00	18,00	19,00	16,00	11,00	6,00	6,00	4,00	134,00
Umidade relativa compensada (%)	76,70	76,30	76,50	77,60	79,10	79,20	78,80	77,90	77,30	77,20	77,90	77,30	77,70
Horas de sol	278,30	243,00	246,00	217,60	204,20	177,40	189,60	206,00	234,80	275,30	272,50	283,60	2828,30

O clima em Aracaju é tropical. Existe muito mais pluviosidade no inverno do que no verão. De acordo com a classificação de Köppen e Geiger (2017) [12] o clima é classificado como Af, o que significa dizer: “A” – Clima Tropical e o “f” de floresta tropical, com chuvas de inverno.

Estes dados mostram que no local escolhido existe uma grande disponibilidade de luz solar, mas que os períodos de chuva afetarão um pouco a produção energética nos meses de inverno, que no Brasil se estende entre os meses de junho, julho e agosto.

A temperatura terá alguma influência na produção durante o verão, quando as temperaturas ficam em torno de 31°C, visto que os painéis ficam com um rendimento melhor em temperaturas mais baixas. Isto irá causar uma redução na potência gerada, mas não muito grande, ao ponto de prejudicar a eficiência do sistema como um todo.

2.3 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico é caracterizado pela emissão de elétrons quando um determinado material é exposto à luz solar. Os elétrons emitidos se direcionam da banda de valência para serem coletados na banda de condução, resultando no surgimento da tensão elétrica.

Este efeito foi observado inicialmente por Alexandre-Edmond Becquerel (Físico

francês, 1820-1891). Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico que explicava como a eletricidade pode ser produzida a partir da luz solar no ano de 1839.

Segundo Fontes [13], “Becquerel criou a primeira célula fotovoltaica do mundo enquanto fazia experimentos no laboratório de seu pai. Em seu experimento, ele colocou cloreto de prata em uma solução ácida e o iluminou enquanto estava conectado a eletrodos de platina. Como resultado, gerou tensão e corrente. No início, o efeito fotovoltaico também era conhecido como o efeito Becquerel.”

A era moderna da energia solar fotovoltaica começou em 1954, quando os investigadores dos Laboratórios Bell nos EUA descobriram acidentalmente que os diodos de junção PN geravam uma diferença de potencial quando as luzes da sala estavam ligadas.

Uma junção PN é a combinação de um material semicondutor do tipo “P”, que possui muitas lacunas e poucos elétrons, com um material também semicondutor do tipo “N”, que possui muitos elétrons e poucas lacunas.

“Quando unidos, as lacunas em excesso no material do tipo P fluem por difusão para o tipo N enquanto os elétrons fluem por difusão do material do tipo N para o tipo P, como resultado dos gradientes de concentração do transportador através da junção. Os elétrons e lacunas deixam para trás cargas expostas em locais de átomos dopantes, fixados na estrutura do cristal.” [14]

“Um campo elétrico “E”, portanto, se acumula na chamada zona de depleção, região ao redor da junção para interromper o fluxo. Dependendo dos materiais utilizados, será formado um potencial interno (V_{bi}) devido a este campo. Se uma tensão for aplicada à junção, E será reduzido.” [14]

“A primeira célula solar moderna de silício foi desenvolvida e apresentada em 1954 pelo Laboratórios Bell (Bell Labs). Possuía apenas 2 cm² de área e uma eficiência de 6%, gerando 5 mW (miliwatt) de potência elétrica. Foi projetado para utilização com baterias, entretanto o seu alto custo inviabilizou a utilização em larga escala.” [13]

“Para que ocorra o efeito fotovoltaico, o material contido na célula deve ser basicamente um semicondutor, visto que os isolantes não se adequam pela baixa condutividade que eles apresentam e os metais concentram uma grande quantidade de elétrons e, por isso, são insensíveis à luz.” [13]

“As células fotovoltaicas são feitas de vários semicondutores, materiais que são apenas moderadamente bons condutores de eletricidade. Os materiais mais

utilizados são o silício (Si) e compostos de cádmio sulfeto (CdS), sulfeto cuproso (Cu₂S) e arseneto de gálio (GaAs).” [1]

“As células de silício amorfo são compostas por átomos de silício em uma fina camada homogênea em vez de uma estrutura de cristal. O silício amorfo absorve a luz com mais eficácia do que o silício cristalino; então as células podem ser mais finas.” [1]

2.4 PAINEL FOTOVOLTAICO

De acordo com o site do Portal Solar, existem no mercado, diversos tipos de painéis fotovoltaicos: de silício, que podem ser monocristalino ou policristalino, de filme fino, de silício amorfo (a-Si), de telureto de cádmio (CdTe), de seleneto de cobre, índio e gálio (CIS /CIGS), Células Fotovoltaicas Orgânicas (OPV) e Painel solar híbrido - HJT. [15]

“A tecnologia monocristalina é a mais antiga e possui a eficiência mais alta. Os painéis solares de silício monocristalino (mono-Si) são facilmente reconhecíveis olhando de perto. “Possuem uma cor uniforme, indicando silício de alta pureza e cantos tipicamente arredondados, e são feitos a partir de um único cristal de silício ultrapuro.” [15].

“O silício cristalino possui uma estrutura cristalina ordenada, com cada átomo idealmente disposto em uma pré-definida posição. Permite, portanto, a pronta aplicação das teorias e técnicas desenvolvidas para a criação de pastilhas fotovoltaicas de material cristalino, e exibe um comportamento previsível e uniforme. É, no entanto, o tipo mais caro de silício, devido aos processos lentos e que exigem muitos cuidados fabricação.” [16].

“O silício multicristalino ou policristalino (poli-silício) mais barato e amorfo portanto, está sendo cada vez mais utilizado para células solares, apesar de serem menos ideais qualidades.” [16]

Nos painéis de silício policristalino, os cristais de silício são fundidos em um bloco, desta forma preservando a formação de múltiplos cristais (daí o nome poli cristalino), são os mais comuns no mercado, devido ao seu preço mais baixo em comparação ao monocristalino. [15]

Os painéis de silício amorfo são construídos utilizando-se várias camadas de células e têm uma estrutura interna constituída por blocos estruturais interligados. O

silício amorfo pode ser produzido, em princípio, em um processo mais barato que o silício policristalino.

“Com silício amorfo, não há ordem de longo alcance na estrutura de arrumação dos átomos, resultando em áreas dentro do material que contém trechos definidos como "pendentes." Estes, por sua vez, resultam em níveis extras de energia dentro da lacuna proibida, tornando impossível dopar o semiconductor quando puro, ou obter fluxos de corrente razoáveis em uma configuração de célula solar.” [16]

“Verificou-se que a incorporação de hidrogênio atômico no silício amorfo, entre de 5 a 10%, satura as ligações pendentes e melhora a qualidade do material.” [16]

“Também aumenta o intervalo de banda (por exemplo) de 1,1 eV em silício cristalino para 1,7 eV, fazendo o material absorver muito mais fortemente os fótons de energia, acima do último limiar. A espessura do material necessário para formar uma célula solar funcional é, portanto, muito menor.” [16]

“O telureto de cádmio é a única tecnologia de painéis solares de película fina que superou o custo/eficiência de painéis solares de silício cristalino em uma parcela significativa do mercado mundial de painéis solares. A eficiência de painéis solares com base na tecnologia de telureto de cádmio opera normalmente na faixa de 9-16%.” [15]

“Os painéis de seleneto de cobre, índio e gálio (CIS /CIGS) têm sido apontados como a mais promissora tecnologia para a produção economicamente viável de eletricidade por via fotovoltaica. As células CIGS são promissoras em parte devido às vantagens dos filmes finos de baixo custo, facilidade de deposição dos semicondutores em grandes áreas usando camadas com micrometros e pela produção de módulos interligados monoliticamente.” [14]

“As células orgânicas são compostas por polímero orgânico, muito leves, flexíveis e semitransparentes. Os polímeros são materiais cuja estrutura principal é composta por carbono. As células orgânicas necessitam de muito menos energia para serem fabricadas do que as de silício convencionais, ou seja, o gasto de energia para serem confeccionadas é pequeno em relação à quantidade de energia que poderão gerar. “As células de silício gastam muita energia para serem construídas.” [14]

“Na avaliação dos painéis fotovoltaicos, as condições de referência (STC) utilizadas são:

- Irradiância solar de **1000 W/m²**,

- Velocidade vento zero,
- Temperatura da célula **25 °C**,
- Distribuição espectral da radiação global a **AM1.5**, (definida nas normas IEC 60904-3 ou pela ASTM G173-3).” [14]

2.5 MODELO EQUIVALENTE

Uma célula fotovoltaica pode ser representada por um circuito elétrico equivalente. O modelo de um diodo e três parâmetros (I_{ph} (corrente fotogerada), I_s (corrente de saturação inversa e m (fator de idealidade), comumente usados para cálculos, é conforme a figura 2.9, abaixo:

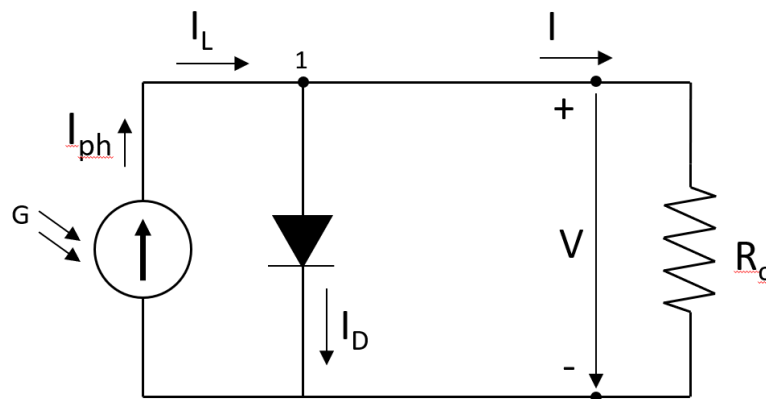


Figura 2-9 – Diagrama esquemático de uma célula fotovoltaica

Uma célula fotovoltaica no escuro comporta-se como um diodo comum. Ao receber a irradiação solar G , a célula gera uma corrente elétrica I_{ph} , unidirecional e constante, de valor proporcional ao nível de irradiação. [17]

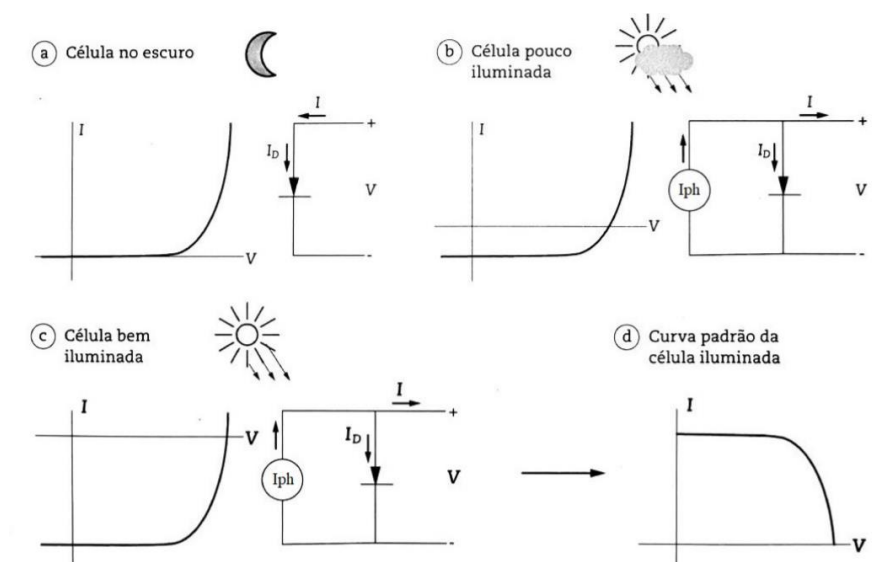


Figura 2-10 - Curvas características I x V de uma célula no escuro e iluminada

Fonte: Zilles et al [17]

O diodo representa uma junção PN e é atravessado por uma corrente I_D , que depende da tensão V nos terminais da célula. Esta corrente é representada pela equação:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

sendo: I_0 a corrente saturação inversa máxima do diodo, V a tensão nos terminais do diodo, m é o fator de idealidade do diodo e V_T o Potencial térmico, em Kelvin.

O valor de V_T é obtido pela equação 2.2 abaixo:

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (2.2)$$

onde: K é igual a $1,38 \times 10^{-23}$ J/K (Constante de Boltzman), T é a temperatura da célula em Kelvin, q é a carga do elétron, igual a $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb.

O fator de idealidade (m) é um parâmetro importante usado para descrever se a junção PN se comporta próxima ou afastada do caso ideal e depende da fabricação do diodo (tipo de material, dopagem, etc.), seu valor se encontra entre 1 e 2, quanto mais próximo de 1, mais ideal é o diodo.

O Fator de idealidade do diodo é encontrado por:

$$m = \frac{V_{\max} - V_{OC}}{V_T \ln \left(1 - \frac{I_{MAX}}{I_{SC}} \right)} \quad (2.3)$$

onde: V_{MAX} é tensão máxima gerada pela célula, V_{OC} é tensão de circuito aberto, V_T é o potencial térmico, em Kelvin, I_{MAX} é a corrente máxima gerada pela célula, I_{SC} é a corrente de curto-circuito.

Para se encontrar o valor da corrente I , aplica-se no ponto marcado como 1 da figura 2.9, a Lei dos Nós de Kirchhoff, que diz que “a soma das correntes que entram em um nó é igual a soma das correntes que saem.” Então temos:

$$I_S = I_D + I$$

$$I = I_S - I_D$$

Como I_D é igual a $I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right)$, a equação da corrente I fica sendo igual a:

$$I = I_S - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

Os dois principais parâmetros de uma célula fotovoltaica é justamente a sua corrente de curto-circuito, o que nos apresente o máximo valor de I , e a Tensão de circuito aberto, que nos mostra o máximo valor de V .

No primeiro caso, a corrente de curto-circuito (I_{SC}), temos as seguintes condições:

$V_{OC} = 0$ (tensão entre os terminais da célula igual a zero), pois os dois pontos estão curto-circuitados;

$I_D = 0$, pois toda a corrente irá fluir pelo curto-circuito.

$I = I_S$, pois como já dissemos, toda a corrente irá fluir pelos terminais em curto.

O outro parâmetro importante a se considerar é a tensão de circuito aberto (V_{CA}), que é o valor máximo de tensão da célula. Neste caso, a corrente I assume o valor igual a zero, pois não há fluxo de corrente, e a tensão V é igual a:

$$I_S - I_0 \left(e^{\frac{V_{OC}}{mV_T}} - 1 \right) = 0 \quad (2.5)$$

$$V_{OC} = mV_T \ln \frac{I_S + I_0}{I_0} \quad (2.6)$$

Ou então:

$$V_{OC} = mV_T \ln \left(1 + \frac{I_S}{I_0} \right) \quad (2.7)$$

Estes parâmetros (I_{sc} e V_{oc}) são normalmente fornecidos pelos fabricantes dos painéis, nas condições STC (Standard Test Conditions), considerando a radiação incidente igual a 1000W/m^2 e temperatura de $298,15\text{ K}$ (25° C).

Outro parâmetro de alta importância é o FF – Fator de Forma, ou Fator de preenchimento (*Fill Factor*), que nos apresenta a relação entre a potência máxima e potência calculada pelo produto da corrente de curto circuito pela tensão de circuito aberto (teórico, pois não se pode ter a corrente de curto circuito e a tensão de circuito aberto ao mesmo tempo):

$$FF = \frac{P_{MAX}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.8)$$

“O fator de preenchimento é uma medida da característica I - V real. Para boas células, seu valor é maior que 0,7. O fator de preenchimento diminui à medida que a temperatura da célula aumenta.” [1]

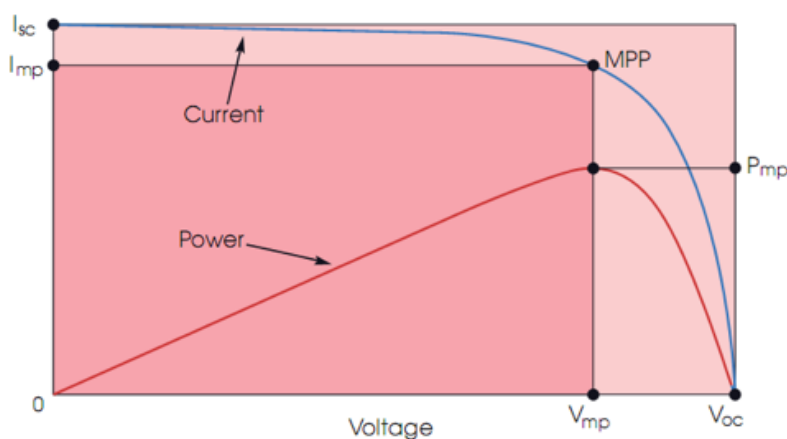


Figura 2-11 - Relação entre os diversos parâmetros de uma célula fotovoltaica

Fonte: Anotações de Aula – Silva [14]

A potência máxima que uma célula pode chegar é obtida pelo produto da corrente máxima pela tensão máxima:

$$P_{MAX} = I_{MAX} \times V_{MAX} \quad (2.9)$$

A potência máxima em condições STC designa-se normalmente por potência de pico (MPP - *Maximum Power Point*).

A potência máxima é o produto da tensão pela corrente. Então usando-se a equação de I (equação 2.5), temos que:

$$P=VI=V\left\{I_S-I_0\left[\exp\left(\frac{V}{mV_T}\right)-1\right]\right\} \quad (2.10)$$

A temperatura de operação de uma célula solar é determinada pelo ar ambiente, temperatura, pelas características do módulo em que é encapsulado, pela intensidade da luz solar incidente no módulo, e por outras variáveis, tais como a velocidade do vento.

Na figura 2.11 podemos observar a relação entre os principais parâmetros: O Fator de Preenchimento (FF), representado pelo retângulo cor de rosa escuro, os pontos de corrente na máxima potência (I_{mp}), de Tensão na máxima potência (V_{mp}), a curva da corrente (em azul), o ponto de corrente de curto circuito (I_{sc}) e a tensão em circuito aberto (V_{oc}). A curva em vermelho representa a potência em função da corrente $I \times$ tensão V geradas pela célula e o ponto da potência de pico (MPP).

O rendimento da célula, (calculado pela equação 2.11) nas condições STC, é a relação entre a potência máxima (equação 2.9) e a potência da radiação incidente:

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{A \times G} = \frac{V_{MAX} \times I_{MAX}}{A \times G} \quad (2.11)$$

onde A é área da célula e G é a Intensidade da radiação incidente (STC)

No modelo com um diodo e cinco parâmetros, além dos três já apresentados (m , I_S e I_0), precisamos também levar em consideração as resistências parasitas em série R_S e em paralelo R_{SH} com o circuito.

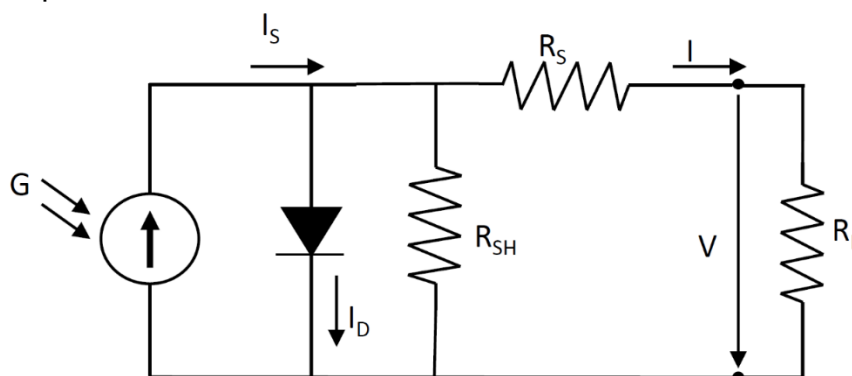


Figura 2-12 - Modelo com um diodo e cinco parâmetros

“A resistência em série representa as resistências do contato entre o metal e o silício, resistência dos contatos metálicos no topo, na base da célula etc.” [14]

Considerando-se somente a resistência em série R_S equação da corrente I passa a ser representada por:

$$I = I_S - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I \times R_S}{mV_T} \right) \right] \quad (2.12)$$

“Os defeitos de produção que provocam caminhos alternativos para a corrente foto-gerada (correntes de fuga), reduzem a corrente que percorre a junção p-n, e assim reduz a tensão da célula solar. Este efeito é particularmente severo para baixos níveis de radiação.” [14]

A equação da corrente considerando-se apenas a resistência paralelo R_P fica sendo:

$$I = I_S - I_0 \left[\exp \left(\frac{V}{mV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V}{R_P} \quad (2.13)$$

Considerando-se simultaneamente as duas resistências (série e paralelo) das equações 2.12 e 2.13, a corrente I passa a ser representada por:

$$I = I_S - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I \times R_S}{mV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V}{R_P} \quad (2.14)$$

A temperatura é também um fator importante, para ser considerado nos projetos de sistemas fotovoltaicos.

Podemos observar no gráfico 2.12 o efeito da temperatura nos painéis FV, que faz com que a tensão do painel diminua, na medida em que a temperatura aumenta, causando assim uma redução na potência final do conjunto gerador.

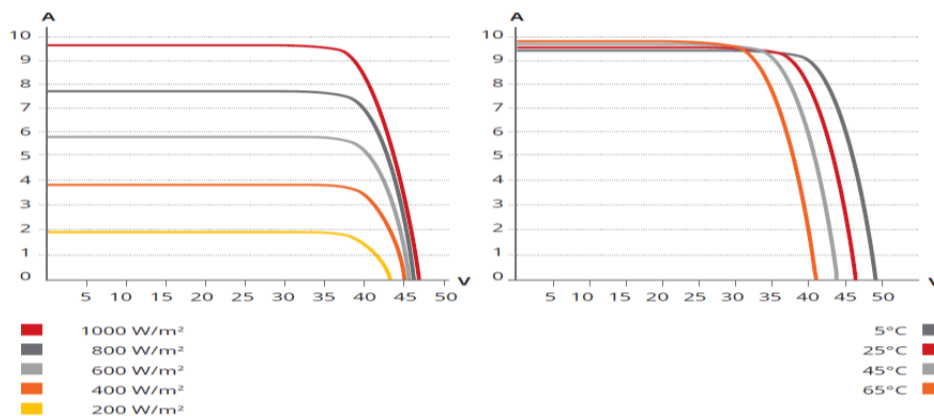


Figura 2-13 - Curvas Corrente e Tensão

Fonte: Canadian Solar Datasheet [18]

3

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo é apresentado o cálculo do sistema fotovoltaico, desenvolvimento do projeto, os programas do Arduíno com as suas interligações com o sistema de geração de energia fotovoltaica e a interface com a internet.

Antes de se instalar um sistema fotovoltaico, deve-se analisar o local onde pretende-se fazer a instalação para verificar inicialmente se existe espaço físico para a instalação dos painéis, se a área definida está livre de sombreamento, se a instalação for em telhado, se suportará o peso dos painéis e principalmente, se a disponibilidade de radiação solar é suficiente.

Para este projeto, será utilizado os dados reais de uma residência na cidade de Aracaju, estado de Sergipe, no Brasil.

Não serão levados em consideração os custos de aquisição, instalação ou de manutenção, visto que fogem do escopo do projeto, mas apenas considerados os aspectos técnicos de projeto e construção.

Nesta análise, foi verificado que os painéis serão instalados em um telhado com a inclinação de 30° e orientado na direção leste - oeste, e ficarão livres de qualquer interferência (sombreamentos).

Consultado o projeto construtivo da residência, foi verificado que o telhado poderá suportar o peso estimado de 260 Kgf, referentes ao peso de 10 painéis de 22,5 Kgf acrescido do peso dos suportes de fixação, estimados em 3,5 Kgf por painel. No total, a carga no telhado será de 13,34 Kgf/m².

3.1 AUDITORIA ENERGÉTICA

Com base nos dados da tabela 3.1, que mostra as características dos painéis a serem utilizados no sistema de geração fotovoltaica, uma vez atendida a todas as premissas já descritas, deve-se então partir para o dimensionamento do sistema.

Tabela 3.1 - Dados Elétricos do Pannel (STC)

ELECTRICAL DATA STC*			
CS3U	350P	Open Circuit Voltage (Voc)	46.6 V
P Nominal Max. Power (Pmax)	350 W	Short Circuit Current (Isc)	9.51 A
Opt. Operating Voltage (Vmp)	39.2 V	Module Efficiency	17.64%
Opt. Operating Current (Imp)	8.94 A	Operating Temperature	-40°C ~ +85°C
* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m ² , spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C			

Se faz necessário efetuar o levantamento do consumo desta residência, e foi realizado um levantamento médio mensal, tendo como base as faturas de energia

elétrica do último ano, geradas pela concessionária de energia elétrica local:

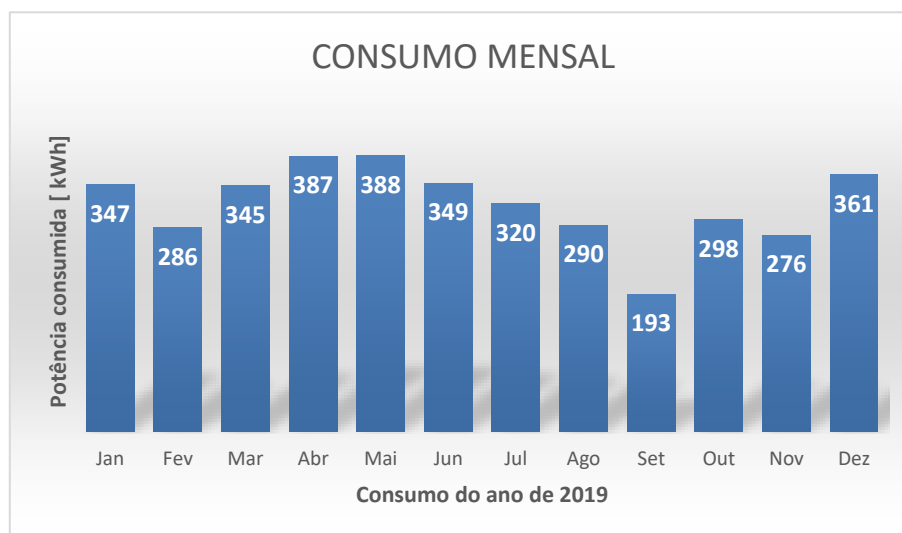


Figura 3-1 - Consumo médio mensal

Fonte: Fatura da Energisa S/A

A quantidade de radiação recebida foi obtida através do *software* JRC *Photovoltaic Geographical Information System* - PVGIS, [19] para as coordenadas aproximadas de 11°00' de Latitude Sul e -37°08', Longitude Oeste, obtendo-se o resultado apresentado na tabela 3.2, abaixo:

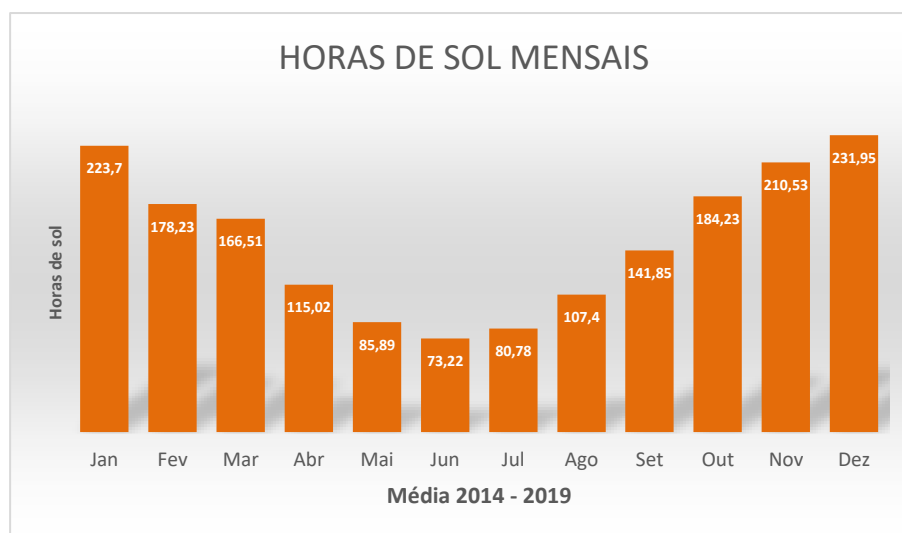


Figura 3-2 - Índice de radiação mensal

Fonte: PVGIS [19]

Estes dados também foram utilizados para calcular o valor médio anual, igual à soma de todos os meses e dividindo por doze (número de meses por ano). Este valor é igual a 149,94h que aproximamos para 150 horas de sol mensais.

3.2 PROJETO DO SISTEMA

O dimensionamento será feito em função do consumo médio mensal, pois o objetivo é ter um sistema que atenda a demanda, na maior parte do tempo. Apesar da média mensal ser de 320 kWh, escolhemos um valor 20% maior (384kWh), o que permite a geração de energia suficiente em dez dos doze meses do ano, ficando dois meses com um valor abaixo, mas muito próximo da produção necessária, que torna remota a necessidade de recorrer à concessionária de energia elétrica local. O excedente da geração mensal poderá ser vendido à concessionária.

“A Razão de desempenho, *performance ratio* - *PR*, é tido como a razão entre a produção final dividida pela produção de referência.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r}$$

sendo Y_f o valor calculado de produção de energia ao longo de um ano e Y_r a disponibilidade média anual de energia solar de pico. Considera-se que varia entre 0.5 e 0.9, mas normalmente usa-se 0.75 (depende de vários fatores, entre os quais meteorológicos)” [14].

O valor de médio de horas de pico solar é obtido da tabela 3.1, somando-se os valores mensais e dividindo-se por doze meses, sendo igual a 150h. Então:

$$\begin{aligned} \text{Potência a instalar} &= \frac{\text{Potência esperada}}{\text{Horas de pico} \times PR} \\ \text{Potência a instalar} &= \frac{384 \text{ kWh}}{150\text{h} \times 0,75} = 3,413 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.1)$$

A quantidade de painéis necessários é igual a divisão da potência a instalar pela potência de cada painel. Neste caso, serão precisos:

$$\text{Painéis} = \frac{\text{Potencia a instalar}}{\text{Potência do painel}} = \frac{3413 \text{ W}}{350 \text{ W}} = 9,75 \cong 10 \text{ painéis} \quad (3.2)$$

Os cálculos acima definem a necessidade de 10 painéis de 350W para atender a demanda pretendida durante dez meses, e nos outros dois meses caso necessário, a complementação da energia disponibilizada pela concessionária local. A potência média diária produzida então será de $10 \times 350\text{W} = 3,5 \text{ kW}$.

De acordo com o fabricante dos painéis, a tensão na máxima potência de um

painel é de 39,2 Volts, e a corrente de curto-circuito de 9,51 Amperes.

Os painéis serão instalados em série, gerando uma tensão final, na máxima potência, igual a 392,0 V_{MP} e uma corrente de 8,94 AMP.

As definições da capacidade do inversor, da bitola dos cabos e outros detalhes comuns em projetos desta natureza tais como os sistemas de proteção, não foram aqui consideradas por não fazerem parte do escopo desta dissertação.

Para a medição proposta para este dimensionamento, poderemos usar um conjunto composto por um Arduíno, um ESP8266-01, um sensor de corrente, e uma fonte de alimentação em cada painel, ou então um único conjunto de Arduíno mais os periféricos para todo o sistema. Optamos pela segunda configuração para reduzirmos o custo com os dispositivos.

Os painéis estarão conectados em série, gerando uma tensão máxima de pico de 392 Volts, alcançada quando tivermos o sol em um ângulo incidente de 90° em relação ao plano da placa, em um dia de verão, sem nuvens. Já a corrente máxima alcançada, nas mesmas condições atmosféricas citadas anteriormente, será de 8,94 Amperes, pois os painéis estarão em série, portanto, a corrente será a mesma igual a de um único painel.

Neste caso, o conjunto de Arduíno mais os periféricos já citados, enviará os dados medidos para um banco de dados SQL, através de um roteador local que poderá ser o mesmo utilizado para o acesso à internet pelos usuários da residência.

A alimentação do conjunto será realizada pela tensão de um dos painéis fotovoltaicos, através do regulador de tensão LM317TG, com uma tensão de saída ajustável de 1,2V a 37V e corrente de saída de até 1,5 A. Este regulador ajustável suporta uma tensão de entrada de 40 V (máximo) fornecendo regulação local, limitação de corrente interna e controle de desligamento térmico, usando apenas dois resistores para definir a tensão de saída.

A cada ciclo, o Arduíno envia para o ESP8266-01 uma *string* com as informações de tensão, corrente, potência e temperatura, que ficarão armazenados em um site para este fim específico.

O pacote de informação é pequeno (*payload* de apenas 25 bytes a cada 10 segundos aproximadamente) e o fluxo de dados gerado não irá causar impactos no uso normal da internet.

A consulta poderá ser feita através de um dispositivo de comunicação, podendo

ser um aparelho celular, um tablet, laptop ou desktop (PC), desde que possuam acesso à internet. Ao digitar o endereço do site no navegador, imediatamente a informação estará disponível, com data e hora de cada registro.

O protótipo utilizado para os testes em bancada do circuito é o que segue na figura 5.7, onde podemos observar: o Arduino⁽¹⁾ (placa azul na parte de baixo), o ESP8266-01⁽²⁾ em um conector sobre um *shield* montado com os componentes eletrônicos para seu funcionamento (placa verde)⁽³⁾. Os dois potenciômetros⁽⁴⁾ usados para a simulação da variação da tensão e da corrente em medição. O circuito integrado que mede a temperatura⁽⁵⁾ está localizado na parte de baixo da protoboard, e ao lado o divisor resistivo⁽⁸⁾. A fonte de alimentação⁽⁶⁾ e o sensor de corrente⁽⁷⁾ são placas separadas.

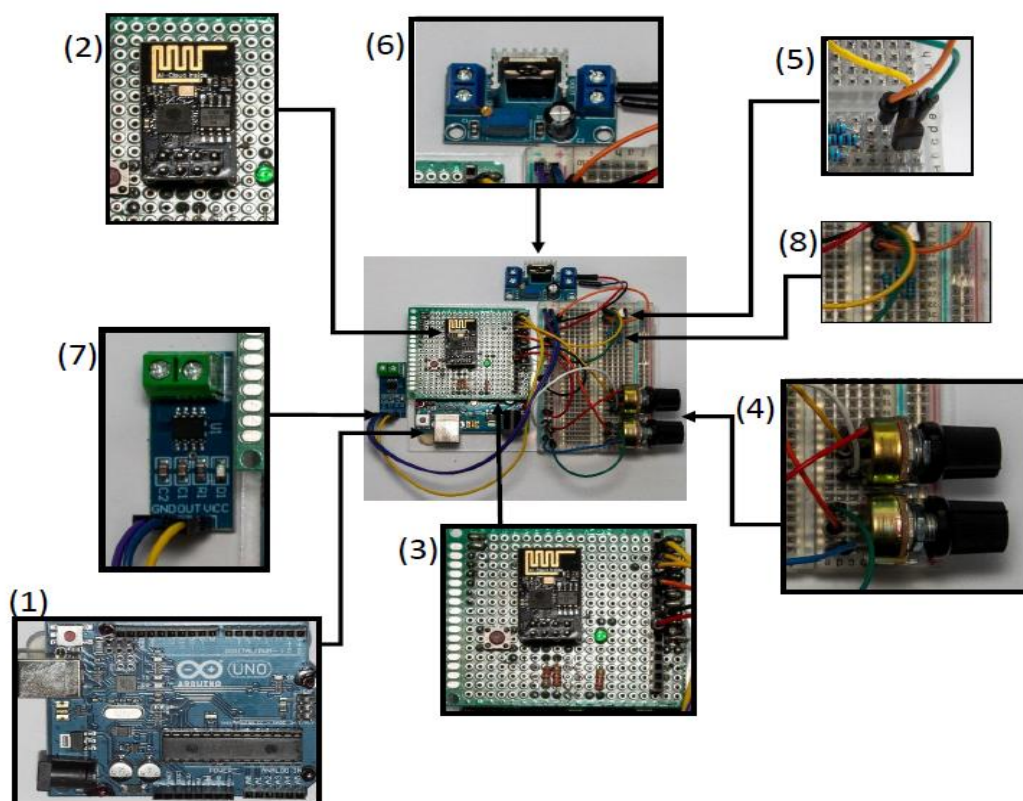


Figura 3-3 - Protótipo utilizado do controlador e periféricos.

O diagrama em blocos do circuito completo está apresentado na figura 3.4 (parte pontilhada):

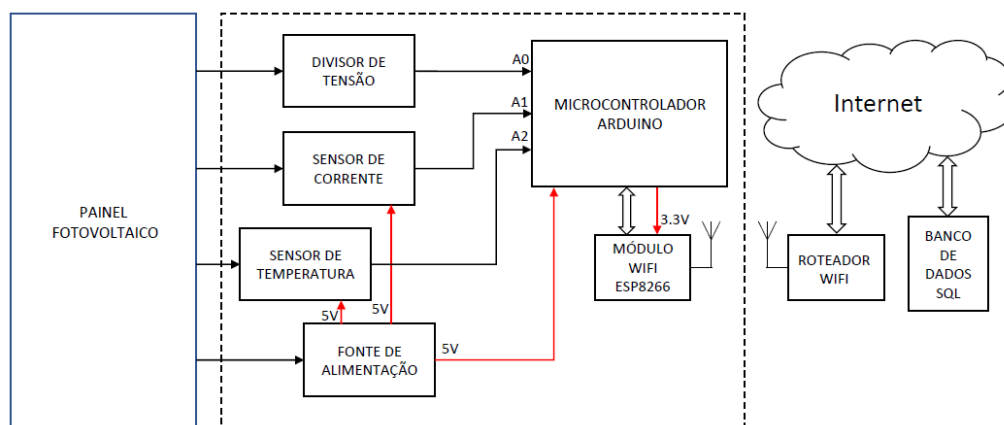


Figura 3-4 - Diagrama em blocos do circuito

Como o projeto foi feito para funcionar no Brasil, a hora registrada é a GMT -3h, que é a hora oficial brasileira (horário de Brasília).

3.3 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO CIRCUITO

3.3.1 O Arduíno

“Originalmente iniciado como um projeto de pesquisa de Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis no Interaction Design Institute de Ivrea, Itália, no início dos anos 2000, ele se baseia no projeto *Processing*, uma linguagem para aprender a codificar no contexto das artes visuais desenvolvidas por Casey Reas e Ben Fry, bem como um projeto de tese de Hernando Barragan sobre o *Wiring board*”². [20]

“O Arduíno é uma plataforma de prototipação eletrônica de código aberto (*open-source*), qualquer pessoa pode produzi-la, fácil de programar e usar, além de possuir preço acessível e ser facilmente encontrada.” [21]

O conjunto Arduíno é composto por Hardware e Software, e existem diversos modelos disponíveis no mercado.

O microcontrolador possui diversas entradas e saídas, para receber e enviar dados para sensores, motores, atuadores, telas, teclados, alto-falantes e milhares de outros dispositivos. Neste trabalho iremos utilizar a plataforma Arduíno “UNO.”

² Wiring Board A Wiring Board é uma placa de E/S eletrônica projetada em torno do ambiente de desenvolvimento de código aberto chamado Wiring, que foi criada com base na linguagem de programação Processing / Wiring. A placa explora as artes eletrônicas, a mídia tangível, a programação de computadores e a criação de protótipos com a eletrônica. [21]

A placa Arduino modelo UNO, apresentada na Figura 3.5, é composta pelo microcontrolador, entradas e saídas analógicas e digitais, terminal de alimentação, conexão USB, entre outros. [22]

A plataforma Arduino possui muita documentação, e facilmente se encontra no mercado módulos compatíveis e bibliotecas com as principais configurações. Por este motivo é muito utilizado em desenvolvimento de projetos.

A placa do Arduino já vem montada com todos os componentes, conectores e soquetes, sendo necessário apenas o programa, alimentação e a conexão das partes para o seu funcionamento.

O microcontrolador Arduino UNO possui os seguintes blocos funcionais, que podem ser visualizados na figura 3.5:

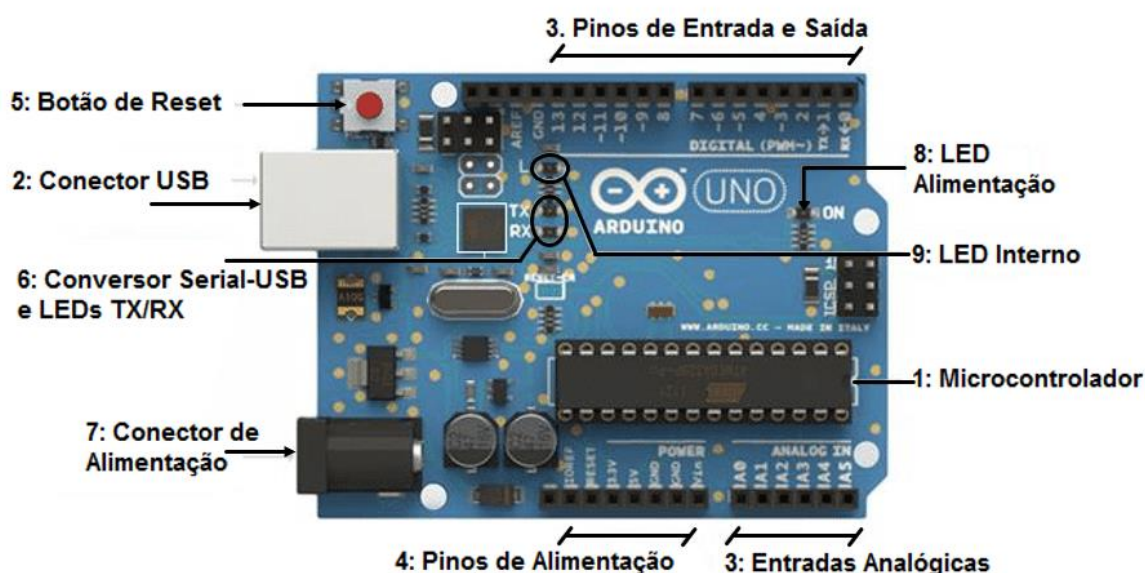


Figura 3-5 - Blocos do Arduino Uno

Fonte: Arduino & Pi Lab. [20]

O Arduino UNO possui as seguintes características:

- Microcontrolador: ATmega328P;
- Tensão Operacional: 5V;
- Tensão de Entrada: 7-12V;
- Portas Digitais: 14 (das quais 6 podem ser utilizadas como PWM);
- Portas Analógicas: 6;
- Corrente Pinos I/O: 20mA;
- Corrente Pino 3.3V: 50mA;

- Memória Flash: 32KB (0,5KB usados no *Bootloader*³);
- SRAM: 2KB;
- EEPROM: 1KB;
- Velocidade do Clock: 16MHz.

3.3.2 ESP8266-01

Para a conexão com um roteador Internet, precisa-se utilizar um Módulo Wireless ESP8266-01 configurado como um *Client*. Este módulo tem as seguintes características:

- Conexão a redes, padrão 802.11 B/G/N;
- Alcance aproximado: 91 metros;
- Tensão de operação: 3.3 VDC;
- Comunicação serial: pinos TX e RX;
- Modos de operação: *Client*, *Access Point*, *Client+Access Point*.
- Modos de segurança wireless: OPEN / WEP / WPA_PSK / WPA2_PSK / WPA_WPA2_PSK;
- Suporta comunicação TCP e UDP, com até 5 conexões simultâneas.



Figura 3-6 - Módulo Wireless ESP8266-01

Fonte: Arduino & Pi Lab. [20]

O módulo possui antena embutida e um conector de 8 pinos, além dos *leds* indicadores de funcionamento (vermelho) e comunicação (azul), além de “um conjunto

³ O *Bootloader* é um programa inicializador, que pode ser escrito no início ou no fim da memória de programa. Seu objetivo geralmente é de preparar o hardware para o funcionamento correto da aplicação e/ou realizar atualizações dessa aplicação.

completo de componentes para processamento (CPU + memória), interfaces de entrada e saída para diversos tipos de protocolos e aplicações e comunicação.” [23]

Segundo o fabricante, a tensão de alimentação nominal deste dispositivo é de 3,3 volts. O consumo de energia fica em torno dos 20 μA no modo *sleep*, e cerca de 50 mA quando em modo de recepção. Quando está transmitindo, a corrente pode chegar a 170 mA. Alcança uma potência máxima de 17 dBm (50 mW).

“O consumo total de energia de um módulo Arduino Uno, juntamente com o ESP8266-01 e o sensor de corrente ACS712 será de, no máximo de 250 mA, considerando-se que o ESP8266-01 vai estar em modo de transmissão durante todo o tempo de operação, então a potência consumida será de 5 Volts x 250 mA, igual a 1,25 Watts.” [23]

3.4 METODOLOGIA

3.4.1 Medida da Tensão

Para a medição da tensão do painel, será necessário a montagem de um circuito composto por dois resistores, formando um divisor de tensão, pois a tensão máxima permitida que o Arduino pode receber em um pino de entrada programável é de 5 Vcc.

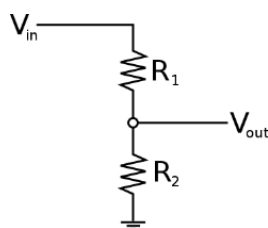


Figura 3-7- Divisor de tensão

Um divisor de tensão bem simples composto por 2 resistores (R_1 e R_2) conectados em série à terra. A tensão de entrada V_{in} (igual ao valor de V_{oc} dos 10 painéis, acrescido de 15%, como margem de segurança) é conectada a R_1 , e o segundo terminal de R_2 deve ser conectado à terra. A tensão de saída V_{out} é obtida na conexão entre R_1 e R_2 , e é sempre uma fração de V_{in} proporcional à relação entre esses 2 resistores, com base na equação a seguir:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.3)$$

Ou seja: a relação entre R_2 e a soma de R_1 e R_2 governa a relação entre a tensão de entrada e a de saída.

Deve-se utilizar um valor de R_1 bem alto, pois quanto maior este conjunto, menor será a interferência no circuito (carga). Aplicando-se valores à equação (3.3) obteremos:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$5 = 536 \times \frac{R_2}{1 \text{ M}\Omega + R_2}$$

$$R_2 = 9416,196 \, \Omega \quad (3.4)$$

Como este valor não é um valor comercial, usaremos a associação de dois resistores de 4,7 k Ω em série, o que resulta em um resistor equivalente de 9,4 k Ω (valor comercial mais próximo). O divisor de tensão deverá ficar o mais perto possível do painel, para evitar uma fiação com tensão elevada muito longa.

A potência a ser dissipada nos resistores deverá ser calculada como sendo a razão entre o quadrado da tensão máxima pela soma dos resistores:

$$P(W) = \frac{V^2}{R_1 + R_2} \quad (3.5)$$

Então a potência dos resistores, através da equação (3.5) será de:

$$P(W) = \frac{536^2}{1 \text{ M}\Omega + 9,4 \text{ k}\Omega} = 0,285 \text{ W}$$

Portanto, pode-se usar resistores de 0,5 W sem problemas de aquecimento.

Para aumentar mais ainda a impedância de entrada do sistema, no que se refere à de medida de tensão, é possível utilizar um *buffer* usando um amplificador operacional típico, com o divisor ligado na porta não inversora, e uma realimentação ligada na porta inversora (ganho = 1)

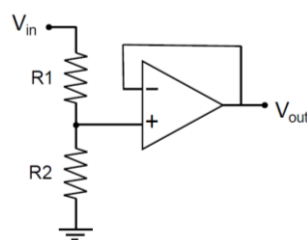


Figura 3-8 - Amplificador operacional básico

O valor de tensão medido será igual a:

$$V = \frac{V_{\text{em A0}}}{1024} \times a_{\text{RefV}} \times \text{relDiv} \quad (3.6)$$

sendo: $V_{\text{em A0}}$ o código gerado em bits correspondentes à tensão que chega no pino A0, vindo do divisor resistivo; a_{RefV} a tensão máxima permitida na porta A0 (5.0 Volts) e relDiv é a relação do divisor resistivo, obtido pela equação:

$$\text{relDiv} = \frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}} \quad (3.7)$$

Aplicando-se os valores de tensão de entrada e tensão de saída à equação 3.7, obtemos o valor de relDiv :

$$\text{relDiv} = \frac{536}{5} = 107,2$$

3.4.2 Medida da Corrente

Para a medição de corrente, utilizaremos o módulo sensor de corrente ACS712, que permite medir uma corrente de até ± 20 A, seja contínua ou alternada.

Este módulo funciona através do efeito Hall, o que permite uma medição segura, sem que haja corrente circulando pelo sensor.

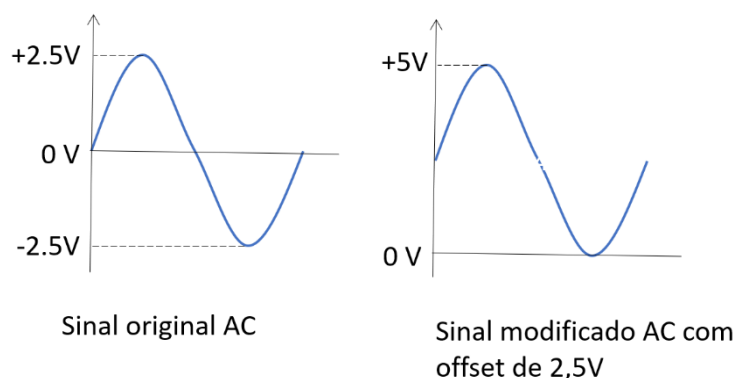
As características deste módulo são:

- Faixa de medição de corrente: ± 20 A;
- Tensão de alimentação do módulo: 5V;
- Tempo de resposta de 5 μ s;
- Saída analógica proporcional de 100 mV/A;
- Dimensões: 30 x 12 x 12mm.

Considerando-se o maior valor de corrente igual a 20 A (I_{max}), e que a saída analógica do módulo gera uma tensão de 100 mV/A, usa-se a seguinte equação:

$$V_{\max} = I_{\max} \times 0,100 \quad (3.7)$$

O sensor ACS712 mede correntes contínuas e alternadas. Na medição de corrente alternada, é incluído um valor de offset de 2,5 V para fazer com que a senoide alternada fique totalmente positiva, pois o arduino não mede valores negativos.



O valor medido pela porta A1 deve, portanto, ser subtraído da tensão de offset (2,5V) depois de ser dividido por 1024, e multiplicado por 0,1 para obteremos o valor em Amperes gerado pelo sistema fotovoltaico:

$$I \text{ (A)} = \frac{(\text{Valor em A1} \times a_{\text{Ref}}) - V_{\text{offset}}}{1024 \times 0,100} \quad (3.8)$$

O valor de tensão máximo gerado pelo módulo pode ser calculado através da equação (3.9) e será igual a:

$$\begin{aligned} V_{\max} &= 20 \times 0,100 \\ V_{\max} &= 2,0 \text{ V} \end{aligned} \quad (3.9)$$

3.4.3 Medida da Potência

Para o cálculo da potência, é suficiente multiplicar os valores medidos de tensão e corrente:

$$P(W) = E(V) \times I(A) \quad (3.9)$$

3.4.4 Medida da Temperatura

A temperatura é medida usando-se o sensor LM35. O Sensor de Temperatura LM35 é um sensor de precisão, que apresenta uma saída de tensão linearmente proporcional à temperatura em que ele se encontra a medir, desde que esteja alimentado por uma tensão contínua e estável entre 4 e 30 Volts, tendo em sua saída um sinal de 10mV para cada grau Celsius de temperatura medida.

O LM35 não necessita de qualquer calibração externa ou “*trimming*” para fornecer com exatidão valores de temperatura com a precisão de 0,25°C, dentro de uma faixa de medição situada entre 2° C à 150° C.

Para se calcular a temperatura, multiplica-se o valor lido pelo pino A2 pela tensão máxima de referência (5 Volts) e divide-se por 1024 e o resultado divide-se por 0,01:

$$\text{Temp}(^{\circ}\text{C}) = \frac{\text{Valor em A2} \times \text{aRefV}}{1024 \times 0,01} \quad (3.10)$$

3.4.5 Alimentação do Circuito

O conjunto Arduino + ESP8266-01 deverá ser alimentado por uma tensão gerada pelo próprio painel fotovoltaico e regulada através do circuito integrado LM317 (regulador de tensão positiva).

A tensão de saída é ajustada pelo potenciômetro R₂, ou substituído por um resistor equivalente. Os capacitores C₁ e C₂ funcionam como filtro de espúrios e estabilização de corrente.

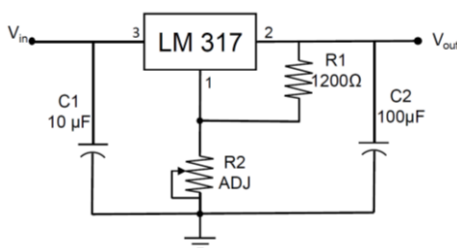


Figura 3-9 - Fonte DC-DC

O valor de R₂ pode ser calculado como sendo igual a:

$$R2 = \left(\frac{V_{OUT}}{1.25} - 1 \right) \times R1 \quad (3.11)$$

Aplicando-se a equação (4.10) obteremos:

$$R2 = \left(\frac{3.3}{1.25} - 1 \right) \times 1.200$$

$$R2 = 1968 \, \Omega$$

ou então podemos usar um valor de $2k\Omega$ para substituir o potenciômetro de ajuste de tensão da fonte de alimentação.

3.5 PROGRAMA PARA O ARDUÍNO E ESP8266-01

A programação do Arduino é feita utilizando-se a linguagem C++, adaptada para o Arduino com pequenas modificações, sendo dividida em três partes principais: estruturas, valores (variáveis e constantes) e funções.

O programa desenvolvido, listado no Anexo 1, serve para controlar as entradas e saídas do Arduino UNO. Os pinos de entrada analógica são: A0, para leitura da tensão, A1 para a medição de corrente, A2 para a medição da temperatura. Como já informado anteriormente, a medição da potência será calculada usando-se a equação $P = V \times I$.

Caso se deseje, pode-se utilizar um display LCD nas entradas A4 e A5, através dos sinais SDA e SCL, respectivamente.

Os resultados podem ser apresentados em várias opções: no display LCD, (com 16 caracteres em duas linhas, com a placa de comunicação serial I2C incorporada ao circuito), na porta serial do Arduino, se conectado a um computador, ou mesmo no telefone celular, desde que conectado à nuvem TCP IP.

O fluxograma que orientou a programação do Arduino se encontra na figura (3.10):

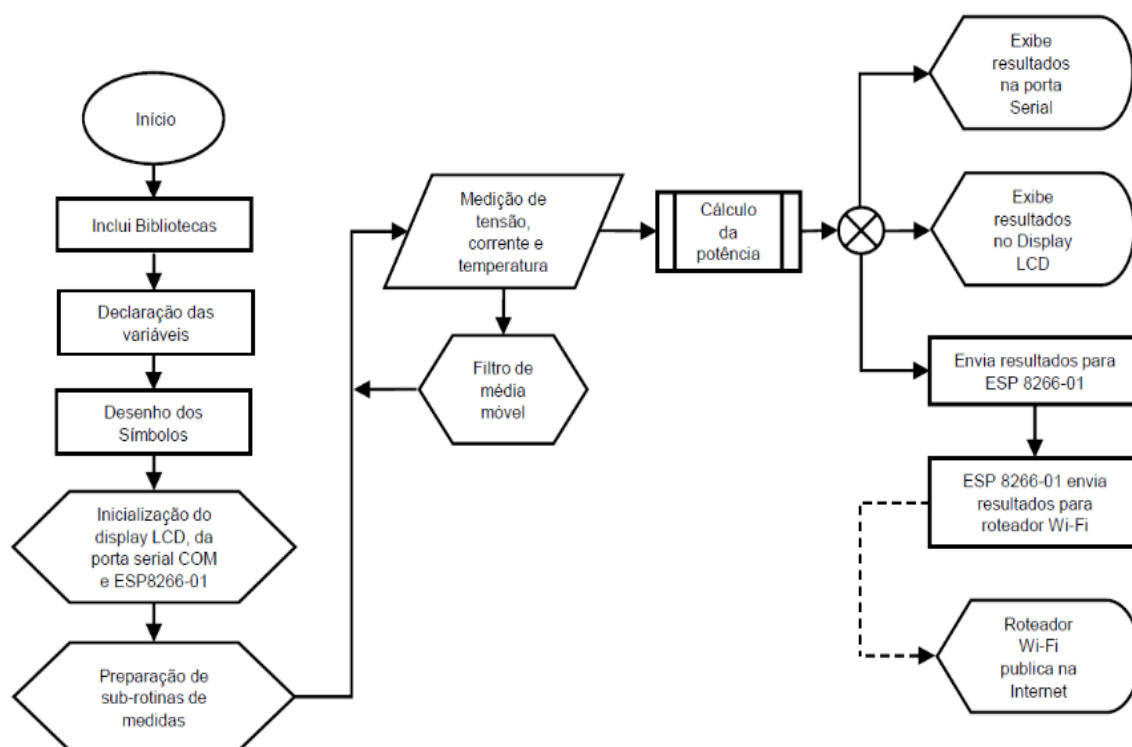


Figura 3-10 – Fluxograma programa do Arduino

O fluxograma da programação do ESP8266-01:

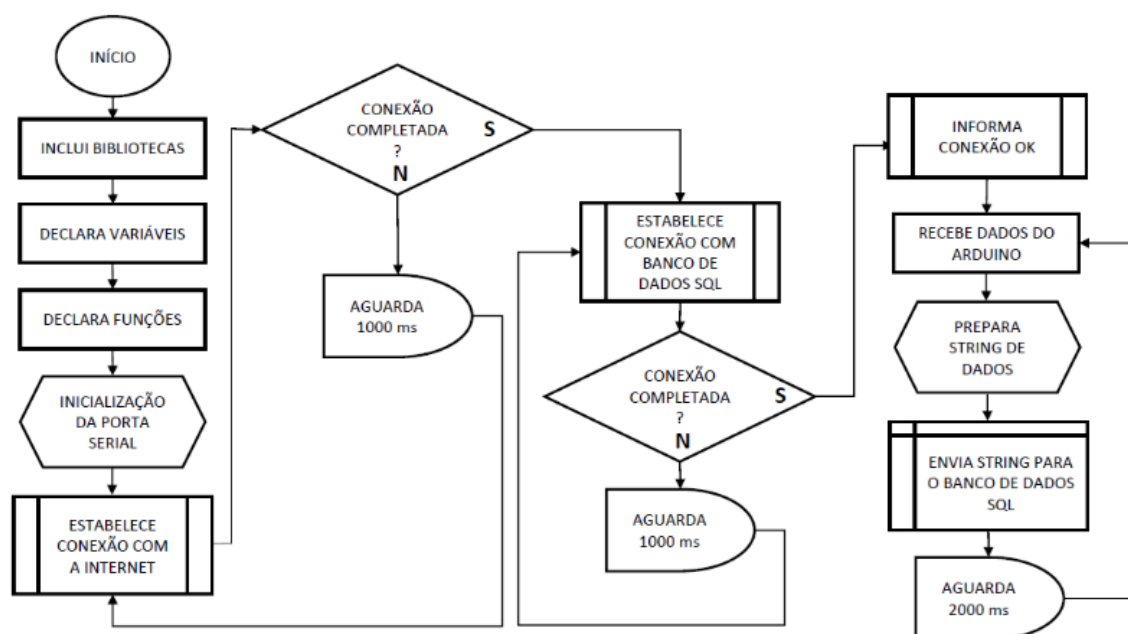


Figura 3-11 - Fluxograma do programa do ESP8266-01

E esse é o fluxograma da programação da página HTML:

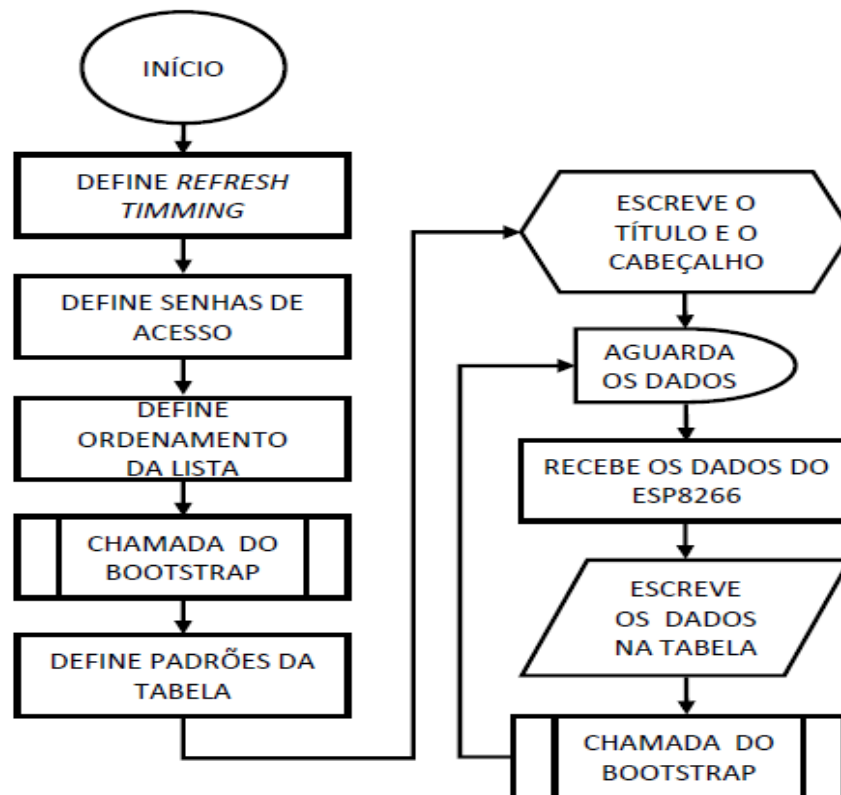


Figura 3-12 - Fluxograma da página HTML

4

4 RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se as análises do problema e os resultados obtidos no projeto.

Para fazer uma comparação entre o modelo equivalente de cinco parâmetros e um circuito real, foi feito um estudo usando o PSIM e um circuito com componentes verdadeiros, e obtido os seguintes resultados:

Inicialmente foi criado o circuito no simulador conforme a figura 4.1:

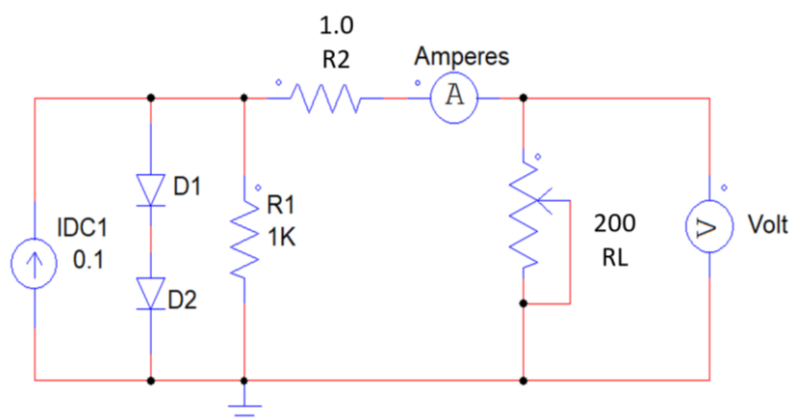


Figura 4-1- Circuito do simulador

Nesta simulação foram considerados os seguintes componentes do circuito:

- Gerador de corrente – 0,1 A;
- Diodo genérico ($R_{\text{interna}} = 10 \, \Omega$, $T_{\text{direta}} 0.6 \, \text{V}$);⁴
- Resistor Série – 1 Ω ;
- Resistor Paralelo (Shunt) – 1.000 Ohms;
- Carga variável – 200 ohms, em passos de 4 ohms.

Os dados obtidos com esta simulação estão na tabela 4.1 e no gráfico da figura 4.2.

Tabela 4.1 - Valores de tensão e corrente do simulador

RL	Volts (V)	I (mA)	RL	Volts (V)	I (mA)	RL	Volts (V)	I (mA)
200	1,19403	5,97016	132	1,19098	9,02257	64	1,18154	18,46160
196	1,19391	6,09138	128	1,19070	9,30234	60	1,18033	19,67220
192	1,19378	6,21763	124	1,19040	9,60002	56	1,17895	21,05270
188	1,19365	6,34922	120	1,19008	9,91737	52	1,17736	22,64150
184	1,19352	6,48650	116	1,18975	10,25640	48	1,17551	24,48980
180	1,19337	6,62985	112	1,18938	10,61950	44	1,17333	26,66670
176	1,19322	6,77967	108	1,18899	11,00920	40	1,17073	29,26830
172	1,19307	6,93643	104	1,18857	11,42860	36	1,16757	32,43250
168	1,19290	7,10060	100	1,18812	11,88120	32	1,16364	36,36370
164	1,19273	7,27727	96	1,18763	12,37120	28	1,15862	41,37940
160	1,19255	7,45343	92	1,18710	12,90320	24	1,15200	48,00000
156	1,19236	7,64332	88	1,18652	13,48320	20	1,14286	57,14290
152	1,19216	7,84315	84	1,18588	14,11770	16	1,12941	70,58830
148	1,19195	8,05370	80	1,18519	14,81480	12	1,10769	92,30770
144	1,19173	8,27588	76	1,18442	15,58440	8	0,79928	99,91000
140	1,19149	8,51065	72	1,18356	16,43840	4	0,39980	99,95000
136	1,19124	8,75914	68	1,18261	17,39130	1	0,09998	99,98000

⁴ Foram utilizados dois diodos em série para facilitar a medição da tensão no circuito.

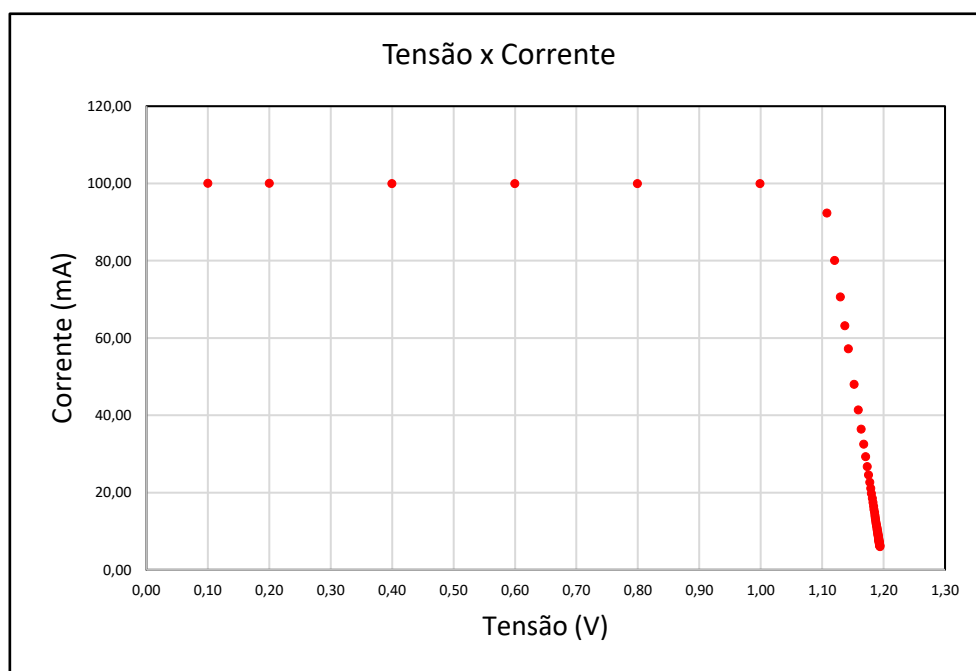


Figura 4-2 - Gráfico Tensão x Corrente

Para poder comparar com o modelo simulado, foi construído um circuito equivalente com componentes reais, conforme a figura 4.3.

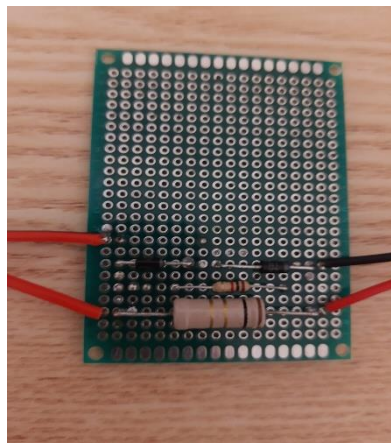


Figura 4-3 - Circuito Eletrônico

Tanto na simulação quanto no circuito real foram utilizados dois diodos em série, para facilitar as medidas de tensão, o que não causa nenhum prejuízo à proposta em análise.

Utilizando-se de um gerador de corrente, foram feitas as medidas nas mesmas condições, cujos valores se encontram na tabela 4.2 e no gráfico da figura 4.4 respectivamente:

Tabela 4.2 - Valores de tensão e corrente circuito real

RL	Volts (V)	I (mA)	RL	Volts (V)	I (mA)	RL	Volts (V)	I (mA)
200	1,5140	7,4230	132	1,4900	11,0150	64	1,4250	21,4250
196	1,5130	7,5650	128	1,4890	11,3450	60	1,4180	22,6750
192	1,5120	7,7150	124	1,4860	11,6950	56	1,4080	24,1050
188	1,5100	7,8700	120	1,4840	12,0550	52	1,3980	25,7000
184	1,5090	8,0350	116	1,4830	12,2550	48	1,3860	27,5850
180	1,5080	8,2050	112	1,4800	12,6550	44	1,3720	29,6850
176	1,5070	8,3850	108	1,4760	13,3150	40	1,3560	32,1550
172	1,5060	8,5650	104	1,4730	13,7850	36	1,3370	35,0500
168	1,5040	8,7650	100	1,4700	14,2950	32	1,3140	38,5250
164	1,5030	8,9650	96	1,4660	14,8450	28	1,2860	42,8150
160	1,5020	9,1750	92	1,4630	15,4450	24	1,2510	48,0750
156	1,5010	9,4050	88	1,4590	16,0750	20	1,2040	54,7500
152	1,4990	9,6450	84	1,4550	16,7750	16	1,1380	63,6350
148	1,4980	9,0895	80	1,4500	17,5350	12	1,0450	75,3750
144	1,4960	10,1550	76	1,4450	18,3750	8	0,9000	89,1100
140	1,4940	10,4250	72	1,4390	19,2950	4	0,5920	98,3750
136	1,4920	10,7150	68	1,4330	20,3050	1	0,3950	98,8950

E com os dados da tabela 4.2 foi construído o gráfico 4.4:

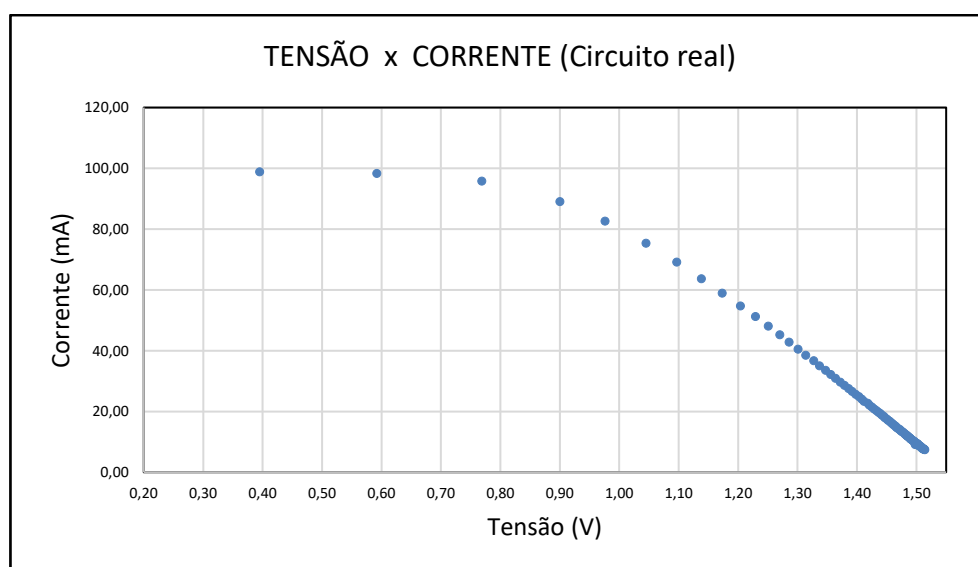


Figura 4-4 - Gráfico Tensão X Corrente no Circuito Real

Superpondo os gráficos obtidos, do simulador e do circuito real, pode-se ter uma melhor análise dos resultados obtidos:

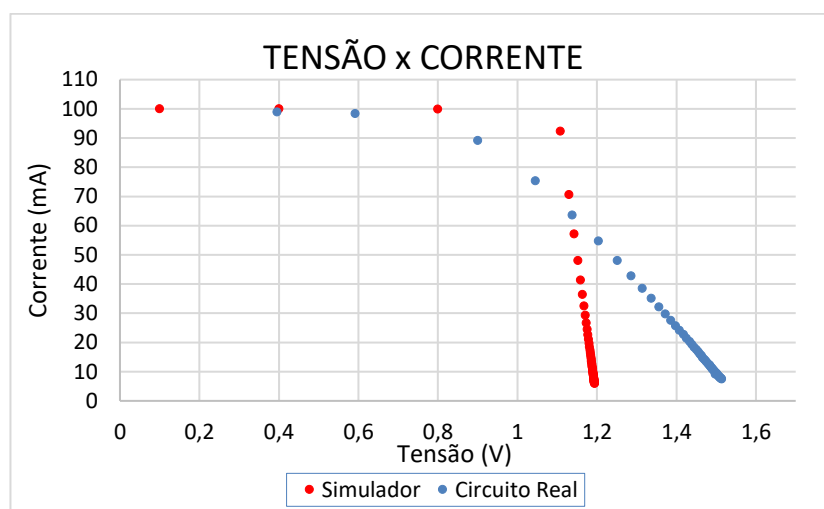


Figura 4-5 – Gráficos superpostos: Simulador e Circuito Real

Após a montagem dos circuitos do Arduino e periféricos, foram feitas algumas análises nos circuitos de medidas de tensão e corrente, para verificar a linearidade.

Para a verificação da linearidade do circuito de medida da tensão, foi injetado na porta A0 uma tensão variando entre 0 e 5,0 V, em passos de 0,05 V.

Foi considerada a tensão de um único painel, com uma tensão máxima de 55V. Traçado então o gráfico da tensão de entrada x tensão medida pelo Arduino, e com os dados foi criada a tabela 4.3, a seguir:

Tabela 4.3 - Valores de tensão medidos

Tensão na porta A0 (V)	Valor da tensão medida (V)	Tensão na porta A0	Valor da tensão medida (V)	Tensão na porta A0 (V)	Valor da tensão medida (V)	Tensão na porta A0 (V)	Valor da tensão medida (V)
0,05	0,54	1,30	14,39	2,55	28,31	3,80	42,54
0,10	1,13	1,35	14,99	2,60	28,84	3,85	43,08
0,15	1,72	1,40	15,47	2,65	29,33	3,90	43,61
0,20	2,26	1,45	16,06	2,70	29,92	3,95	44,10
0,25	2,74	1,50	16,65	2,75	30,51	4,00	44,58
0,30	3,38	1,55	17,13	2,80	31,04	4,05	45,22
0,35	3,92	1,60	17,72	2,85	31,64	4,10	45,76
0,40	4,46	1,65	18,32	2,90	32,23	4,15	46,08
0,45	5,00	1,70	18,80	2,95	32,71	4,20	46,57
0,50	5,53	1,75	19,39	3,00	33,42	4,25	47,16
0,55	6,12	1,80	19,87	3,05	34,11	4,30	47,59
0,60	6,66	1,85	20,46	3,10	34,59	4,35	48,18
0,65	7,14	1,90	21,05	3,15	35,13	4,40	48,66
0,70	7,79	1,95	21,54	3,20	35,56	4,45	49,25
0,75	8,38	2,00	22,18	3,25	36,15	4,50	49,86
0,80	8,86	2,05	22,83	3,30	36,63	4,55	50,48
0,85	9,35	2,10	23,31	3,35	37,01	4,60	51,06
0,90	9,99	2,15	23,85	3,40	37,71	4,65	51,57
0,95	10,53	2,20	24,38	3,45	38,19	4,70	52,13
1,00	11,06	2,25	24,92	3,50	38,78	4,75	52,67
1,05	11,60	2,30	25,57	3,55	39,42	4,80	53,22
1,10	12,14	2,35	26,05	3,60	39,91	4,85	53,66
1,15	12,68	2,40	26,59	3,65	40,66	4,90	54,25
1,20	13,37	2,45	27,18	3,70	41,20	4,95	54,84
1,25	13,86	2,50	27,66	3,75	41,73	5,00	55,00

Com bases nesta tabela, foi feito o gráfico abaixo, para uma melhor visualização:

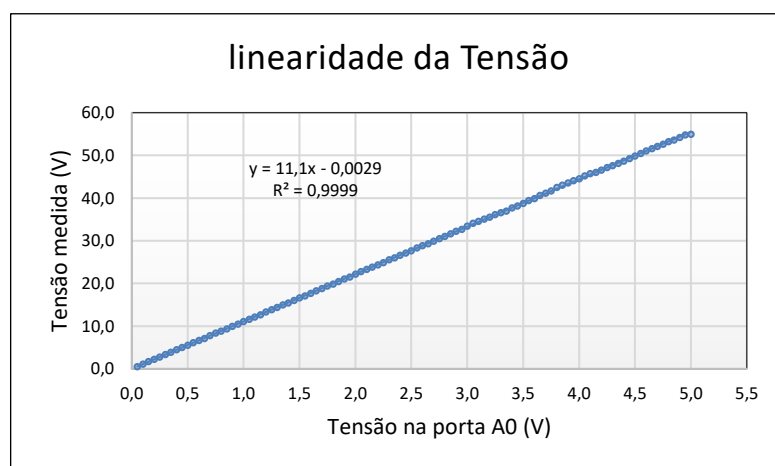


Figura 4-6– Linearidade do sensor de Tensão

A linearidade do circuito, representada pelo índice de correlação linear R^2 calculado com um valor muito próximo da unidade (0,9999) e o termo independente da equação da curva muito próximo de zero (-0,0029). Como o circuito de medição de tensão ficou com uma excelente linearidade, não se fez necessário o uso do buffer para elevar a impedância do circuito.

A linearidade do sensor de corrente foi analisada usando-se um circuito gerador de corrente. A linearidade deste circuito pode ser verificada da mesma maneira que a linearidade da medida da tensão. Na tabela 4.4 foram registrados os valores gerados de corrente e os valores medidos pelo circuito, e com base nesta, criamos o gráfico da figura 4.6:

Tabela 4.4 - Valores de corrente

Tensão do circuito (V)	Valor Medido (A)	Tensão do circuito (V)	Valor Medido (A)	Tensão do circuito (V)	Valor Medido (A)	Tensão do circuito (V)	Valor Medido (A)
0,00	0,00	0,95	5,15	1,90	10,34	2,85	15,44
0,05	0,29	1,00	5,41	1,95	10,63	2,90	15,78
0,10	0,55	1,05	5,70	2,00	10,85	2,95	15,99
0,15	0,79	1,10	5,97	2,05	11,16	3,00	16,28
0,20	1,06	1,15	6,28	2,10	11,43	3,05	16,58
0,25	1,35	1,20	6,47	2,15	11,77	3,10	16,81
0,30	1,61	1,25	6,81	2,20	12,04	3,15	17,27
0,35	1,87	1,30	7,07	2,25	12,25	3,20	17,39
0,40	2,14	1,35	7,34	2,30	12,56	3,25	17,69
0,45	2,45	1,40	7,60	2,35	12,80	3,30	18,00
0,50	2,68	1,45	7,89	2,40	13,17	3,35	18,24
0,55	3,00	1,50	8,14	2,45	13,37	3,40	18,45
0,60	3,24	1,55	8,39	2,50	13,59	3,45	18,73
0,65	3,54	1,60	8,67	2,55	13,88	3,50	19,00
0,70	3,75	1,65	8,95	2,60	14,15	3,55	19,27
0,75	4,08	1,70	9,26	2,65	14,44	3,60	19,53
0,80	4,30	1,75	9,52	2,70	14,70	3,65	19,80
0,85	4,59	1,80	9,82	2,75	14,94	3,70	20,06
0,90	4,90	1,85	10,06	2,80	15,21		

Para melhor visualização dos resultados obtidos, a forma gráfica:

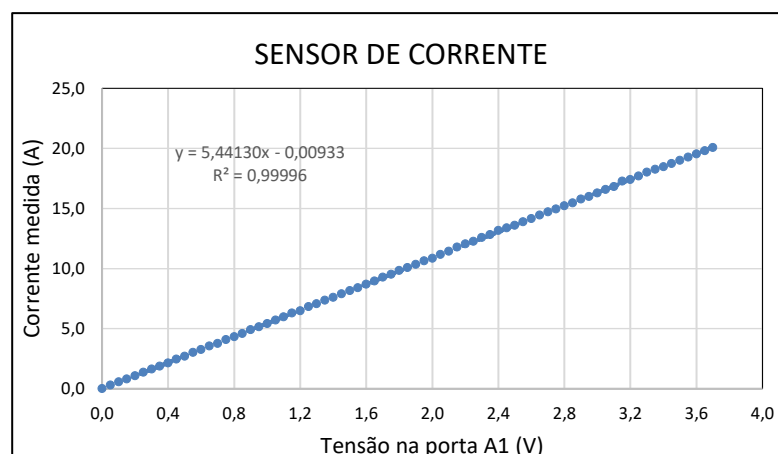


Figura 4-7 - Linearidade do Sensor de Corrente

A linearidade do circuito pode ser comprovada através do índice de correlação linear R^2 também com valor próximo a unidade (0,99996), e o termo independente da equação da curva muito próximo de zero (-0,0093).

Neste projeto, foram utilizadas as seguintes linguagens de programação: C++ no Arduino e no ESP8266-01, HTML, PHP e Bootstrap na página dos resultados e PHP e SQL no Banco de dados.

Com relação aos custos do sistema de monitoração, apresentamos abaixo uma tabela com os valores em Euros, comparando os preços médios de revendas autorizadas em Portugal, no Brasil e na China.

Tabela 4.5 - Preços médio dos Dispositivos eletrônicos⁽¹⁾

Dispositivo	Portugal ⁽²⁾	Brasil ⁽³⁾	China ⁽⁴⁾
Arduino UNO	€ 20,19	€ 11,16	€ 4,63
ESP8266-01	€ 7,10	€ 3,60	€ 1,09
Fonte DC-DC	€ 4,13	€ 4,33	€ 0,69
Sensor Corrente 20A	€ 5,27	€ 3,83	€ 1,59
Sensor Temp. LM35Z	€ 1,50	€ 2,64	€ 0,67
Resistores (6)	€ 0,60	€ 0,78	€ 0,12
Miscelâneos	€ 5,00	€ 5,00	€ 2,00
Total	€ 43,78	€ 31,34	€ 10,79

(1) - Cotação do dia 22 de fevereiro de 2020.

(2) - Preços médios de Lojas Revendedoras Autorizadas.

(3) - Preços médios de Revendedoras Autorizadas, câmbio 1€ = R\$ 6,52.

(4) - Preços médios unitários em Euros.

E para concluir este capítulo, apresenta-se abaixo a página HTML que pode ser vista ao se acessar o Banco de Dados SQL com as informações sobre o sistema fotovoltaico:

https://www.sysiot.xyz/roberto/

Não seguro sysiot.xyz

GERENCIAMENTO DE PAINEL FOTOVOLTAICO - IoT

Medições

por: Roberto Schmalb

DATA	HORA	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	POTÊNCIA [W]	TEMPERATURA [°C]
2021-02-22	10:02:44	36.46	7.23	263.61	15.8
2021-02-22	09:53:01	38.18	7.57	289.02	15.43
2021-02-22	09:52:41	38.19	7.57	289.10	15.43
2021-02-22	09:52:20	38.19	7.57	289.10	15.58
2021-02-22	09:52:00	38.18	7.57	289.02	16.02
2021-02-22	09:51:40	38.19	7.57	289.10	16.09
2021-02-22	09:51:19	38.19	7.57	289.10	15.48
2021-02-22	09:50:59	38.18	7.57	289.02	15.92
2021-02-22	09:50:39	38.18	7.57	289.02	15.41
2021-02-22	09:50:18	38.19	7.59	289.86	15.72
2021-02-22	09:49:58	38.19	7.57	289.10	15.45
2021-02-22	09:49:38	38.19	7.57	289.10	15.89
2021-02-22	09:49:17	38.19	7.58	289.48	15.43
2021-02-22	09:48:57	38.19	7.57	289.10	15.45
2021-02-22	09:48:37	38.19	7.57	289.10	15.55
2021-02-22	09:48:16	38.18	7.57	289.02	15.48
2021-02-22	09:47:56	38.19	7.57	289.10	15.45

Figura 4-8 - Página HTML

5

5 Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as conclusões do problema e as propostas para futuros trabalhos.

Acreditamos que mesmo utilizando componentes de baixo custo, como o Arduíno e seus periféricos, poderemos conseguir realizar o gerenciamento de um sistema residencial de geração de energia fotovoltaica com informações relevantes à manutenção da performance inicial.

A nossa proposta de criar um sistema de baixo custo e boa eficiência e pequeno tamanho foi atingida. O conjunto Arduíno e ESP8266-01 em função do seu tamanho, pode ser colocado por trás de um painel, dentro de uma pequena caixa a prova de intempéries, com as dimensões de 30 x 60 x 100 (AxLxP, em mm), gerando as informações necessárias para monitorização proposta, por tecnologia sem fios (WiFi).

O custo total de um sistema de monitorização proposto neste trabalho corresponde a menos de 0,01% dos preços médios de um sistema fotovoltaico, com 3,5 kW de potência, no mercado de Portugal.

Com os circuitos do Arduíno e do ESP8266-01 montados, e a utilização de fontes de tensão e corrente em laboratório, pudemos observar o funcionamento do projeto, visualizando-se as medidas no display LCD e/ou no telefone celular / tablet / Desktop, de maneira semelhante, que é o nosso objetivo final.

Com a monitorização das características operacionais dos painéis e do sistema como um conjunto, poderemos observar qualquer alteração significativa na instalação do sistema fotovoltaico, possibilitando a sua correção em tempo hábil.

Existe ainda a possibilidade da inclusão de mais uma medição, pois a entrada analógica A3 do Arduíno ficou disponível. Sendo necessário apenas a inclusão de um sensor específico para esta medição, e a inclusão da função desta medida no programa.

Terminado este trabalho, esperamos ter contribuído para a melhoria do conhecimento de sistemas alternativos para o gerenciamento do processo de geração de energia elétrica fotovoltaica e dos dispositivos eletrônicos abordados neste estudo.

PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho não encerra o estudo sobre as diversas possibilidades de aprofundamento de outras soluções.

Ainda existem mais alguns parâmetros que podem ser analisados em um

sistema fotovoltaico residencial ou mesmo expandir este projeto para sistemas maiores, com capacidades de geração mais elevadas.

Por exemplo, podemos citar: a medição dos valores de potência entregues à concessionária de energia elétrica local também é um ponto a ser analisado, assim como a potência consumida da concessionária, permitindo um controle maior e melhor das faturas mensais. A conexão ou desconexão de cargas através de um sistema remoto também é interessante, pois permite ao usuário decidir o que deve estar conectado ao sistema fotovoltaico ou conectado à rede elétrica, após a análise dos dados gerados.

Por fim, utilizar de outros modelos de microprocessadores, de menor tamanho e custo ainda mais reduzido, ou mesmo outros modelos de ESP8266, mais completos, que podem até excluir o Arduino do circuito.

REFERÊNCIAS

- [1] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering: Processes and Systems, Oxford, Reino Unido: Elsevier Inc., 2014.
- [2] J. A. Duffie e W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2013, p. 928.
- [3] “Infinity Sun,” [Online].
- [4] . M. d. F. . O. Saraiva e K. . d. S. Oliveira Filho, “Classes de Luminosidade e Diagrama HR,” julho 2013. [Online]. Disponível em: https://lief.if.ufrgs.br/pub/cref/n29_Muller/aula2/aula2h.pdf. [Acesso em 21 junho 2020].
- [5] E. B. Pereira, R. M. Fernando, R. G. André, S. C. Rodrigo, J. L. d. L. Francisco, R. Ricardo, L. d. A. Samuel, M. T. Gerson, V. P. Silvia e G. d. S. Jefferson, Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2 ed., São José dos Campos, São Paulo: INPE, 2017, p. 88.
- [6] R. T. A. Prado, L. B. Arruda, A. M. d. Barros Filho, V. M. Taboriansky, C. Y. Kawakita e L. O. Arantes, Levantamento do Estado da Arte: Energia Solar, São Paulo: Projeto FINEP, 2007.
- [7] M. H. Macagnan, Introdução à Radiação Solar, 1 ed., São Leopoldo, Rio Grande do Sul: Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, 2010, p. 100.
- [8] N. A. D. Yamamoto, “Células Solares orgânicas baseadas nas estruturas heterojunção em bicamada e heterojunção de volume,” Curitiba, 2014.
- [9] M. Taschuk e R. Tucker, “Solar Simulation,” g2voptics, 2020. [Online]. Disponível em: <https://g2voptics.com/>. [Acesso em 20 junho 2020].
- [10] T. Chigueru e F. N. Moszkowicz, Atlas Solarimétrico do Brasil - Banco de dados solarimétricos, U. F. d. P. -. UFPE, Ed., Recife, Brasil: Editora Universitária da UFPE, 2000.
- [11] Costa, Maria Cristina G., “INMET - Normal Climatológica,” 2021. [Online]. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. [Acesso em 30 julho 2020].
- [12] M. C. Peel, T. A. Finlayson e T. A. McMahon, “Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification,” Copernicus Publications, 2007, p. 12.

- [13] R. Fontes, "Efeito Fotoelétrico - Fotovoltaico," 2020. [Online]. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br>. [Acesso em 21 março 2020].
- [14] H. G. Silva, *Anotações de Aula - TEF, Évora, Portugal*, 2019.
- [15] Portal Solar, "Tipos de painel fotovoltaico," 2020. [Online]. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>. [Acesso em 9 julho 2020].
- [16] R. S. Wenham, A. M. Green, E. M. Watt e R. Corkish, *Applied Photovoltaics*, Padstow, Cornwall: TJ International Ltd., 2007.
- [17] R. Zilles, W. N. Macedo, M. Galhardo e S. Oliveira, *Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede elétrica*, São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- [18] Canadian Solar Datasheet, *KuMax (1000 V / 1500 V) SUPER HIGH EFFICIENCY POLY GEN4 MODULE*, California,, 2017.
- [19] C. d. o. t. E. Commission, "Photovoltaic Geographical Information System - PVGIS," European Commission, 11 Fevereiro 2020. [Online]. Disponível em: <https://re.jrc.ec.europa.eu/>. [Acesso em 21 junho 2020].
- [20] T. C. Almeida, A. Julião, E. Dias e N. Paim, "Arduíno & Pi Lab," Instituto de Física da UERJ, julho 2017. [Online]. Disponível em: <https://Arduinopilab.wordpress.com/>. [Acesso em 20 março 2020].
- [21] Athos Electronics, "O que é o Arduíno," 17 maio 2020. [Online]. Disponível em: <http://athoselectronic.com>. [Acesso em 27 maio 2020].
- [22] C. B. d. Lima e M. V. Villaça, *AVR e Arduíno - Técnicas de Projeto*, Florianópolis, Brasil: Edição dos Autores, 2012.
- [23] S. Oliveira, *Internet das Coisas com ESP8266*, São Paulo, Brasil: Novatec Editora Ltda, 2017.
- [24] A. Merke, "Climate-Data.org," AM Online Projects, 2020. [Online]. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/>. [Acesso em 30 junho 2020].
- [25] S. F. Electronics, "Wiring Board," 2020. [Online]. Disponível em: <https://sparkfun.com>. [Acesso em 2020 junho 30].
- [26] F. Pereira, "Dimensionamento de um sistema FV autonomo para moradia unifamiliar," Newton C. Braga, 2018. [Online]. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br>. [Acesso em 21 junho 2020].

- [27] J. R. L. S. Correia, “Estudo e aplicação de um sistema de Concentração Fotovoltaica (CPV) com utilização de células Multijunção,” Lisboa, 2018.
- [28] M. S. Ortiz, J. M. d. A. Espinoza, J. R. Ducati e A. B. Westphalen, “Utilização de sensores de radiação solar para a análise da distribuição espacial de Insolação,” em *XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Santos, São Paulo, 2017.
- [29] R. Dião, “A Eclíptica,” Creative Commons, 2020. [Online]. Disponível em: http://www.cienciaviva.pt/equinocio/lat_long/. [Acesso em 06 julho 2020].
- [30] A. Thomsen, “Tutorial Módulo Wireless ESP8266 com Arduino,” 2020. [Online]. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/>. [Acesso em 30 07 2020].
- [31] T. Almeida, “Arduino: Primeiros passos,” Departamento de Física da Universidade do Estado do Rio de Janeiro -UERJ, 2020. [Online]. Disponível em: <https://Arduinopilab.wordpress.com/2017/03/28/Arduino-primeiros-passos/>. [Acesso em 27 maio 2020].
- [32] “Blog Arduino,” Arduino CC, 2020. [Online]. Disponível em: <https://www.Arduino.cc/>. [Acesso em 27 maio 2020].
- [33] “O que é Arduino,” Athos electronics, 2020. [Online]. Disponível em: <https://athoselectronics.com/o-que-e-Arduino/>. [Acesso em 27 maio 2020].
- [34] T. R. Oliveira, “<http://www.cpdee.ufmg.br/~troliveira/index.html>,” Escola de Engenharia da UFMG, 2019. [Online]. Disponível em: <http://www.cpdee.ufmg.br/~troliveira/index.html>. [Acesso em 29 setembro 2020].
- [35] Pereira, C. D. D. L. Marinoski, R. Lamberts e E. Ghisi, “Guia de medição e cálculo para refletância e Absortância solar em superfícies opacas,” Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, Brasil, 2015.
- [36] N. C. Braga, “<https://www.newtoncbraga.com.br/>,” 2020. [Online]. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque/950-cmrr-rejeicao-em-modo-comum.html>. [Acesso em 29 setembro 2020].
- [37] J. Gregorio-Hetem, J.-P. Vera e C. M. d. Oliveira, “Cap. 10 - Estrelas: classificação espectral,” 11 novembro 2010. [Online]. Disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/~jane/aga215/>. [Acesso em 06 julho 2020].

ANEXO I – PROGRAMA DO ARDUÍNO

```

/* ===== */
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// Inicializa o display no endereço 0x27 SDA= A4 e SCL=A5
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);
int samples = 20; // quantidade de amostragem
int samples_current = 0; //zerar amostragens
int leitura = 2000; //tempo entre leituras
int analogAverage (byte a);
#define Amostragem 20

// ===== Definição dos Símbolos desenhados =====
byte a[8]={B00110,B01001,B00110,B00000,B00000,B00000,B00000,}; // grau
byte b[8]={B01111,B00000,B01110,B00001,B01111,B10001,B01111,}; // a com til
byte c[8]={B00100,B01010,B01110,B10001,B11111,B10000,B01110,}; // e com circunflexo

// ===== Inicialização das Medições =====
// Tensão Vin no pino A0
float tensaoA0;
float aRefV=5.0;
float aRefA = 3.7;
float relDiv = 107,2;
// Corrente Icc no pino A1
float corrA1;
// Potência
float potencia;
// Temperatura no pino A2
float tempA2;
// ===== Início do Setup =====
void setup() {
  lcd.begin (16,2);
  lcd.setBacklight(LOW);
  Serial.begin (115200);
  pinMode (13, OUTPUT);
}
// ===== Cálculo de média móvel =====
float lePorta(uint8_t portaAnalogica) {
  float total=0;
  for(int i=0; i<Amostragem; i++) {
    total += 1.0 * analogRead(portaAnalogica);
    delay(5); }
  return total / (float)Amostragem; }
// ===== Sub rotinas do display LCD =====
void mostraTensoes() {
  lcd.setBacklight(HIGH);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Tens");
  lcd.createChar(1,b);

```

```

lcd.setCursor(4,1);
lcd.write(1); // ===== escreve o símbolo '~' =====
lcd.write("o: ");
lcd.print(tensaoA0,2);
lcd.println ("Vcc ");
}
void mostraCorrente() {
  lcd.setBacklight(HIGH);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Corrente: ");
  lcd.print(corrA1,2);
  lcd.print ("A ");
}
void mostraPotencia() {
  lcd.setBacklight(HIGH);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Pot");
  lcd.createChar(1,c);
  lcd.setCursor(3,1);
  lcd.write(1); // ===== escreve o símbolo '^' =====
  lcd.print("ncia: ");
  lcd.print(potencia,1);
  lcd.print ("W ");
}
void mostraTemperatura() {
  lcd.setBacklight(HIGH);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Temper.: ");
  lcd.print(tempA2,2);
  lcd.createChar(1,a);
  lcd.setCursor(14,1);
  lcd.write(1); // ===== escreve o símbolo '°' =====
  lcd.print ("C ");
}
//===== Início do Loop =====
void loop(){
  // ===== apaga led 13 =====
  digitalWrite (13, LOW);
  // ===== inicia a medição dos painéis =====
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(" Painei Solar ");
  mostraTensoes();
  tensaoA0 = (lePorta(A0))/1024.0*aRef*relDiv;
  delay(leitura);
  mostraCorrente();
  corrA1 = (((lePorta(A1)/1024)*5.0)- 2.5 ) / 0.100;
  delay(leitura);
  mostraPotencia();
  potencia = tensaoA0 * corrA1;
}

```

```
delay(leitura);
mostraTemperatura();
tempA2 = (lePorta(A2)*aRef)/1024 / 0.01;
delay(leitura);
// ===== Sub-rotina de LOG =====
if (samples_current <= samples ) {
  String dataout;
  dataout.concat("'NULL','NULL',");
  dataout.concat(String(tensaoA0));
  dataout.concat(",");
  dataout.concat(String(corrA1));
  dataout.concat(",");
  dataout.concat(String(potencia));
  dataout.concat(",");
  dataout.concat(String(tempA2));
  dataout.concat(",");
  Serial.println (dataout);
}
}
```

ANEXO II – PROGRAMA DO ESP8266-01

```

/* ===== */
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <ESP8266WebServer.h>
#include <ESP8266mDNS.h>
#include <MySQL_Connection.h>
#include <MySQL_Cursor.h>
#include "Arduíno_secrets.h"
String data1,data2,data3,data4;

// ===== Declaração as variáveis para o WiFi =====
char ssid [] = SECRET_SSID;          // SSID (nome)
char pass [] = SECRET_PASS;          // password
int status = WL_IDLE_STATUS;         // status

// ===== Declaração das variáveis para o MySQL =====
IPAddress server_addr (255,25,255,255); // IP do Servidor
char user[] = SECRET_USERDB;         // MySQL user login username
char password[] = SECRET_PASSDB;     // MySQL user login password
WiFiClient client;
MySQL_Connection conn((Client *)&client);
// =====Declaração das Funções =====
void conectaWifi();
void enviaDados();
void setup() {
  while (!Serial) { }

  conectaWifi();
  while (!conn.connect(server_addr, 3306, user, password)) {
    Serial.println("Conexão SQL falhou.");
    conn.close();
    delay(1000);
    Serial.println("Conectando SQL novamente.");
  }
  Serial.println("Conectado ao servidor SQL.");
}
void loop() {
  if (Serial.Disponível em() > 0) {
    data1 = Serial.readString();
    MySQL_Cursor *cur_mem = new MySQL_Cursor(&conn);
    String query = "INSERT INTO nome do site VALUES ";
    query.concat (data1);
    char input_array[query.length()];
    query.toCharArray(input_array,query.length() );
    cur_mem->execute(input_array);
    delete cur_mem;
  }
}

```

```
        Serial.println(query);
        Serial.println("Informações Enviadas");
    }
    delay(100);
}

void conectaWifi() {
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        Serial.print("Attempting to connect to SSID: ");
        Serial.println(ssid);
        // Conecta a rede usando WPA/WPA2
        status = WiFi.begin(ssid, pass);
        delay(10000); }
    Serial.println("Connected to wifi"); }

void enviaDados() {
    MySQL_Cursor *cur_mem = new MySQL_Cursor(&conn);
    cur_mem->execute(query);
    delete cur_mem;
    Serial.println("Informações Enviadas");
}
```

ANEXO III –PÁGINA HTML

```

<!-- ===== -->
<!--CONEXÃO DO PHP COM A BASE DE DADOS -->
<?php
header("Refresh: 30");
$username = "USERNAME";
$password = "PASSWORD";
$database = "DATABASE";
$mysqli = new mysqli("localhost", $username, $password, $database);
$query = "SELECT * FROM MEDIDAS ORDER BY DATE1 DESC, TIME1 DESC;";

?>
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>

<!--LINHA P/ CHAMA O BOOTSTRAP -->
<link rel="stylesheet" href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@4.5.3/dist/css/bootstrap.min.css"
integrity="sha384-TX8t27EcRE3e/ihU7zmQxVncDAy5uIKz4rEkgIXeMed4M0jlfIDPvg6uqKI2xXr2"
crossorigin="anonymous">

<style>
table{opacity:0.95;}
h1{ color: blue; font-size: 38px; font-family: arial,calibri; text-shadow: 2px 2px black; text-align: center; }
h2{ color: blue; text-shadow: 1px 1px 1px black; font-family: arial,calibri; text-align: center;}
h3 {color: black; font-size: 16px; font-family: arial,calibri rgba(0,0,0,0.8);text-align: right; margin-right: 180px }

</style>
</head>

<body>
<h1> GERENCIAMENTO DE PAINEL FOTOVOLTAICO - IoT </h1>
<h2>Medições </h2>
<h3> por: Roberto Schmalb</h3>
<div class="row justify-content-center">
<div class="col-sm-1 "></div>
<div class="col-sm-10">

<table class="table table-borderless table-striped table-sm table-responsive table-hover ">
<thead class="thead-dark">
<tr>
<th><center> DATA</center></th>
<th><center> HORA</center></th>
<th><center> TENSÃO [V]</center></th>
<th><center> CORRENTE [A]</center></th>
<th><center> POTÊNCIA [W]</center></th>
<th><center> TEMPERATURA [°C]</center></th></tr>

```



```

        </tr>
    </thead>
<tbody>
    <!--RESULTADO DA CONSULTA DO BANCO DE DADOS -->
    <?php
    if ($result = $mysqli->query($query)) {
        while ($row = $result->fetch_assoc()) {
            $field1name = $row["DATE1"];
            $field2name = $row["TIME1"];
            $field3name = $row["VOLTAGE1"];
            $field4name = $row["CURRENT1"];
            $field5name = $row["POWER1"];
            $field6name = $row["TEMPERATURE1"];
            echo ' <tr class="table-secondary">
                <th><center>'. $field1name. '</center></th>
                <th><center>'. $field2name. '</center></th>
                <th><center>'. $field3name. '</center></th>
                <th><center>'. $field4name. '</center></th>
                <th><center>'. $field5name. '</center></th>
                <th><center>'. $field6name. '</center></th>
            </tr>;
        }
        $result->free();
    }
    ?>
    </tbody>
</table>
</div>

<div class="col-sm-1"></div>
</div>
<!--LINHA P/ CHAMAR O BOOTSTRAP -- TEM QUE ESTAR DENTRO DO BODY -->
<script src="https://code.jquery.com/jquery-3.5.1.slim.min.js" integrity="sha384-
    DfXdz2htPH0lsSSs5nCTpuj/zy4C+OoFVy3MVbN+IbbVYUew+OrCXaRkfj "
    crossorigin="anonymous"></script>

<script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@4.5.3/dist/js/bootstrap.bundle.min.js" integrity="sha384-
    ho+j7jyWK8fNQe+A12Hb8AhRq26LrZ/JpcUGOn+Y7ReNrN/tE3MoKZeZDyx"
    crossorigin="anonymous"></script>

</body>
</html>

```